

# الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



## وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة قاصدي مرباح - ورقلة

قسم الفيزياء

### مذكرة لنيل شهادة ماستر أكاديمي

تخصص: فيزياء المواد

من إعداد الطالب: زناوي محمد الشيخ

بعنوان:

تحديد خصائص الانتشار الذاتي واللاذاتي للفسفور في  
الجيرمانيوم

نوقشت بتاريخ: 2022/06/08

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة:

رئيساً	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ محاضر - أ	سوداني محمد البار
مناقشا	المدرسة العليا للأساتذة ورقلة	أستاذ محاضر - ب	جريوي محمد
مشرفاً ومقرراً	المدرسة العليا للأساتذة ورقلة	أستاذ محاضر - أ	سويقات محمد القادر

الموسم الجامعي: 2022/2021

# الوفاء

بعد بسم الله وحمده وشكره وثنائه وعفوه والصلاة على النبي أشرف الأنبياء والمرسلين  
سيدنا محمد وعلى اله وصحبه ومن تبعهم بإحسان إلى يوم الدين ...

إلى من تملك قلبا بحنانه ورحمته رعاني ومن دعائها كان ضياء طريق وسرتوقي ونجاحي  
والى من صبرت وسهرت الليل وذاقت المرارة لي يكون تخرجي ونجاحي ثمرة وهدية لها بعد  
طول الانتظار \*\*\*\*أمي الغاية\*\*\*

إلى من أحمل لقبه بكل افتخار.....روح أبي غفرالله ذنبه واسكنه أعلى جناته ورحمه  
برحمته وغفرانه \*\*\*\*أبي الغالي\*\*\*

والى أخي الغالي ساعد زناتي الذي كان سندي وأبي الثاني والى أختاي التي شاركوني حياتي  
سعادتي وأحزاني

والى من كان له الفضل من أساتذتي فبعلمه ونصحهم وتهجيم كان وصولي إلى ما أنا عليه  
والى كل أصدقائي وأحبابي قريب أو بعيد كان سند في حياتي

كما لا أنسى أستاذي الفاضل "عبد القادر سويقات" الذي أشرف على هذا العمل وكان له  
في الفضل لتقديمه على أحسن وجه وصورة ولكل من كان له اليد في هذا العمل  
والى من حفظهم قلبي ونسبهم قلبي

أهديكم جميعا هذا العمل....فأسأل الله أن ينفع كل طالب العلمي

زناتي محمد الشيخ  
زناتي محمد الشيخ

# شكر وتقدير

اشكر الله على حمده وتوفيقه ومنه وكرمه وعرفانه على إتمام هذا العمل فنحمده حمدا لا يحصي ثنائه وعلى عظمي صفاته وكمال جلاله وسلطان مقامه.

يسعدني بعد الانتهاء من هذا العمل أن يكون شكري في المقام الأول بعد شكر وحمد الله أستاذي الفاضل دكتور **\*\*عبد القادر سويقات\*\*** على قبوله أشرف على هذه المذكرة المتواضع وسعة صدره وسمو أخلاقه ونبيلها فقد كان توجيهه وأشرده من نجاح هذا العمل فنسأل الله دعاء بشكر والتوفيق في حياته وأن يكون هذا العمل في ميزان حسناته.

إلى الأساتذتي أعضاء لجنة المناقش **\*\*سوداني محمد البار رئيسا\*\*** جريوي محمد **مناقشا\*\*** على قبولهم قرأت هذا العمل فشرف لنا بتصويبهم وملاحظاتهم وتقييمهم له.

كما أشكر أستاذتي الذي انتفعت بعلمه طولت فترة دراستي في الجامعة فسأل الله الثناء لهم والشكر والعرفان كما لا أنسى إدارة قسم الفيزياء في جامعة قاصدي مرباح التي أتحت لنا الفرصة.

كما أشكر كل صديق عرفته طول فترة دراستي في الجامعة فقد عرفة نعمة الأخوة وكانت صدقتهم كنز في حياتي فسأل الله التوفيق لهم والنجاح.

فنسأل الله كل الخير والفضل من يده في هذا العمل وطول فترة دراستي الجامعة.

زناتي محمد الشيخ

# الفهرس

العنوان	الصفحة
الإهداء.....	I
الشكر والتقدير.....	II
الفهرس.....	III
قائمة الأشكال.....	IV
قائمة الجداول.....	VIII
قائمة الرموز.....	IX
المقدمة.....	1
<b>الفصل الأول: أنصاف النواقل وممزاها</b>	
تمهيد.....	3
1.1 العوازل، أنصاف النواقل والنواقل.....	3
1.1.1 العوازل.....	3
2.1.1 النواقل.....	3
3.1.1 أنصاف النواقل.....	4
2.1 أنواع أنصاف النواقل.....	5
2.2.1 أنصاف النواقل الذاتي (الاصلية).....	5
2.2.1 أنصاف النواقل اللاذاتية (المطعمة).....	6
1.2.2.1 نصف الناقل من نوع n.....	7
2.2.2.1 نصف الناقل من نوع p.....	8
3.1 طرق التطعيم.....	10
1.3.1 طريقة الانتشار.....	10
2.3.1 طريقة الغرس الأيوني.....	11

12	4.1 منبع الشوائب المطعمة.....
14	مراجع الفصل الأول.....
	<b>الفصل الثاني:الجيرمانيوم وخواصه</b>
15	تمهيد.....
15	1.2 اكتشاف الجيرمانيوم.....
16	2.2 تواجد الجيرمانيوم في طبيعة.....
17	3.2 معدن الجيرمانيوم.....
18	4.2 تنقية الجيرمانيوم.....
18	1.4.2 طريقة تشوخرالسكي Czochralski.....
19	2.4.2 طريقة الصهر النطاق Float zone.....
20	5.2 البنية البلورية.....
21	1.5.2 التكوين البلورية.....
22	6.2- الفصل الطاقوي للجيرمانيوم.....
23	7.2 تركيز حاملات الشحنة الذاتية.....
24	8.2 العيوب النقطي للجيرمانيوم.....
25	1.8.2 تركيز العيوب في حالة التوازن.....
25	9.2 آلية الانتشار المجهرية للفسفور في الجيرمانيوم.....
26	10.2 معامل الانتشار الذاتي.....
26	1.10.2 الدراسة النظرية لمعامل الانتشار.....
28	11.2 معامل انتشار الفسفور في الجيرمانيوم.....
29	مراجع الفصل الثاني.....
	<b>الفصل الثالث : نمذجة ومحاكاة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم</b>
31	تمهيد.....
31	1.3 نمذجة الانتشار.....
33	1.3 نمذجة الانتشار.....

34	.....3.3 نتائج ومناقشة
34	.....1.3.3 محاكاة المنحيات التجريبية
35	.....2.3.3 عامل التناسب التريعي
36	.....3.3.3 معامل الانتشار الذاتي
38	.....مراجع الفصل الثالث
39	.....الخاتمة
40	.....خلاصة

# قائمة الأشكال

الرقم	محتوى الأشكال	الصفحة
<b>الفصل الأول</b>		
1	يوضح مستويات الطاقة للغزل.....	3
2	يوضح مستويات الطاقة للنواقل.....	4
3	يوضح مستوى الطاقة شبه الناقل.....	4
4	يوضح مخططات الطاقة للمواد المختلفة.....	5
5	يوضح الرابطة التساهمية لذارة السيلكون والجيرمانيوم.....	6
6	يوضح التطعيم من النوع السالب وتحرير الإلكترون.....	7
7	يوضح مستوى المنحآت المشغول بالالكترونات وانتقال الالكترونات بعد اثارها	8
8	يوضح التطعيم من النوع الموجب وتحرير الثقب.....	9
9	يوضح المستويات الطاقوية للآخذات داخل المستويات الممنوع.....	9
10	منحنيات الانتشار خلال مرحلة التوضع.....	10
11	منحنيات الانتشار الذاتي لمرحلة التوزيع.....	11
12	مخطط الغرس الأيوني.....	12
<b>الفصل الثاني</b>		
13	أول الترانزستور في مختبر بيل عام 1948.....	15
14	يوضح موقع الجيرمانيوم في الجدول الدوري.....	16
15	يوضح معدن رينيريت renierite.....	18
16	يوضح طريقة (Czochralski).....	19
17	يوضح طريقة الصهر النطاقي.....	19
18	جيرمانيوم أحادي البلورة.....	20

19	يوضح ذرة الجيرمانيوم.....	20
20	يوضح الذرات داخل البلورة.....	21
21	رسم تخطيطي يوضح بنية البلورية للجيرمانيوم.....	22
22	مقارنة بين تغيرات الفاصل الطاقى للجيرمانيوم والسيلسيوم بدلات درجة الحرارة	24
23	يوضح توجد الفجوة داخل الشبة البلورية.....	24
24	يوضح تواجد البنية الذاتية داخل الشبكة البلورية.....	25
25	يرز مخطط آلاية الفجوة.....	26
26	الحاجز الكموني أثناء الانتقال من موضع إلى آخر.....	27
27	يمثل تغيرات معامل انتشار $P$ في الجيرمانيوم حسب المراجع المذكورة.....	

### الفصل الثالث

28	مقارنة منحنيات المحاكات والمنحنيات التجريبية [1] مفاة بواسطة SIMS.....	34
29	مقارنة منحنيات المحاكات والمنحنيات التجريبية [1] مفاة بواسطة SRP.....	35
30	تغيرات عامل التناسب التربع مع مقلوب درجة الحرارة.....	35
31	تغيرات معامل الانتشار مع مقلوب درجة الحرارة.....	37



# قائمة الجداول

الرقم	محتوى الجدول	الصفحة
<b>الفصل الأول</b>		
1	يبين قيم مقدار طاقة التأين المقدر بـ $eV$ لبعض المطعومات المانحة.....	8
2	يبين طاقة التأين المقدرة بـ $eV$ لبعض الشوائب الآخذة .....	9
3	يوضح منابع المطعومات.....	13
<b>الفصل الثاني</b>		
4	يوضح الخواص الفيزيائية للجيرمانيوم.....	17
5	بعض خامات الجيرمانيوم.....	17
6	يمثل قيم حد الأنطروي $P$ وطاقة تنشيط في الجيرمانيوم.....	28
<b>الفصل الثالث</b>		
7	يبين مختلف المقادير المستخدمة في المحاكاة.....	34
8	قيم معامل الانتشار الذاتي المافقة لدرجات الحرارة المبينة.....	36

# قائمة الرموز

## قائمة الرموز

الرمز	مدلول الرموز	وحدته
$E_g$	عرض العصابة الممنوعة	eV
$E_c$	مستوى النقل	eV
$E_v$	مستوى التكافؤ	eV
$E_F$	مستوى فيرمي	eV
$n_i$	كثافة حاملات الشحنة الذاتية	$cm^{-3}$
$N_c$	كثافة فعالة للالكترونات في عصابة النقل	$cm^{-3}$
$N_v$	كثافة فعالة للثقوب في عصابة التكافؤ	$cm^{-3}$
$N$	تركيز الالكترونات الحرة	$cm^{-3}$
$P$	تركيز الثقوب	$cm^{-3}$
$T$	درجة الحرارة	K
$K_B$	ثابت بولتزمان	$eV.K^{-1}$
$C$	تركيز الشائبة المطعمة	$atom.cm^{-3}$

## المقدمة

إن أغلب الأجهزة الإلكترونية الحديثة تعتمد في عملها على المواد ذات خصائص فيزيائية وكيميائية مميزة وهي المواد نصف الناقلة التي تمتلك خواص العوازل عند درجات الحرارة الدنية كما لها القدرة على النقل الكهربائي عند ارتفاع درجة حرارتها إلى حد معين. حيث بدأت البحوث المكثفة والموسعة للتعرف على الخواص البنيوية، الضوئية وكذلك الكهربائية لهذه المواد وإمكانية الاستفادة القصوى منها عمليا حيث أثمرت هذه البحوث على تصنيع المقاومات، الديود و الترانزستور ومن ثم الخلايا الشمسية وكذلك تصنيع الدارات الإلكترونية المتكاملة والتي تعتبر الخليفة الحديثة للترانزستور وبهذا صار حقل فيزياء أنصاف النواقل من أهم حقول الفيزياء التطبيقية والذي مازال يتطور ويتقدم بخطوات متسارعة حتى دخل إلى أغلب مجالات الحياة اليومية.

منذ مدة يعتبر السيليسيوم العمود الفقري لصناعة المركبات الالكترونية ويرجع ذلك لوفرتة وخصائصه المميزة وأكسيده  $Si_2O_4$  عازل مقبول ممايسط صناعة هذه المكونات, لكن مواصلته لسيرورة التطور والتقدم التكنولوجي الحاصل باتت تواجه صعوبات متزايدة مع كل جيل من التكنولوجيا, والتي أصبح المعيار فيها هو تحجيم المكونات وزيادة سرعة معالجة المعلومات، الأمر الذي أصبح يشكل تحديا يصعب تجاوزه مع المحافظة على السيليسيوم كمادة أساسية لصناعة هذه المكونات، وهو مادفع بالتفكير والبحث عن مواد بديلة تمكن من ذلك.

حركية حاملات الشحنة المرتفعة وقصر الفصل الطاقوي لدى الجيرمانيوم, جددت الاهتمام بهذا نصف الناقل كمرشح واعد لتعويض السيليسيوم وتحقيق المزيد من التقدم في هذا المجال، وحفزت على دراسة انتشار المطعومات بنوعيتها السالب والموجب في هذا النصف الناقل باعتباره مفتاحا لتحقيق دارت نانومترية مطورة وجدة فعالة.

في هذا الإطار سنتطرق في هذه المذكرة إلى دراسة لانتشار الفسفور في الجيرمانيوم نهدف من خلالها على التعرف على آلية انتشار الفسفور في الجيرمانيوم وتحديد مميزاته في شروط الانتشار الذاتي واللاذاتي من خلال محاكاة منحنيات تجريبية. أتمنا ذلك وفق خطة بحث تضمنت مقدمة و ثلاث فصول وخاتمة للدراسة.

❖ **الفصل الأول:** تطرقنا فيه إلى العوازل, النواقل و انصاف النواقل الأصلية والمطعمة بنوعيتها النوع n و

النوع p.

❖ **الفصل الثاني:** تطرقنا فيه إلى عنصر الجيرمانيوم وخواصه, حيث تطرقنا إلى اكتشافه وتواجده في الطبيعة

وطرق تنقيته كما تطرقنا إلى البنية البلورية له والفاصل الطاقوي وتركيز حاملات الشحنة الذاتية.

- ❖ **الفصل الثالث :** قمنا بنمذجة ومحاكاة انتشار الفوسفور في الجيرمانيوم واستنتاج عامل التناسب التربيعي بين معامل الانتشار ومربع تركيز الالكترونات الحرة في الجيرمانيوم وحددنا كيفية ارتباط معامل الانتشار الذاتي للفوسفور في الجيرمانيوم بدرجة الحرارة.
- ❖ **الخاتمة :** لخصنا فيها النتائج المتحصل عليها في هذه المذكرة.



الفصل الأول :

أنصاف النواقل ومميزاتها

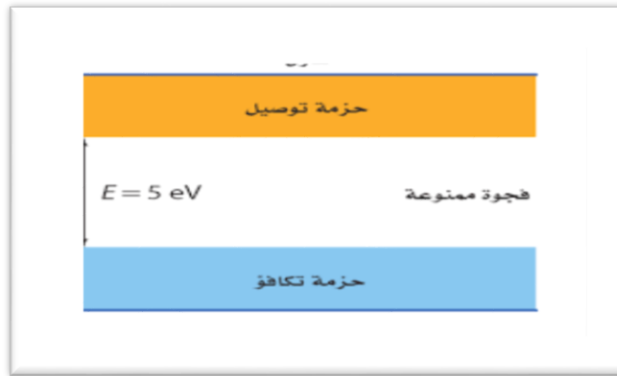
## تمهيد

تصنف المواد حسب ناقليتها للتيار الكهربائي إلى ثلاثة أصناف عازلة ونصف ناقلة وناقلة. في هذا الفصل سنتطرق إلى أنصاف النواقل وأنواعها ومميزاتها وطرق تطعيمها.

## 1.1-العوازل, أنصاف النواقل و النواقل

## 1.1.1-العوازل

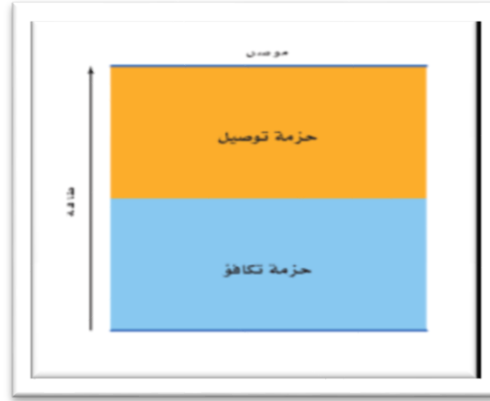
هي مواد تملك مقاومة نوعية كبيرة لمرور التيار الكهربائي تتراوح ما بين ( $10^{14}$  إلى  $10^{22} \Omega/cm$ ) وهذا راجع لاتساع الحزمة الممنوعة نتيجة الفرق الكبير بين حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل والذي يكون في حدود من 3 إلى 8 إلكترون فولط. بحيث إذا استخدمنا مجال كهربائي لمنح أي إلكترون طاقة لتخطي النطاق المحظور ستكون الطاقة كبيرة جدا وتبلغ شدة المجال الكهربائي حوالي ( $6 \times 10^8 v/cm$ ) تقريبا, لذلك من المستحيل منح أي إلكترون هذه الطاقة وبالتالي لا يوجد أي إلكترون في نطاق التوصيل. مثل هذه المواد نجد الخشب, الكوارتز, البلاستيك, المطاط, الزجاج.... [1.2.4]



الشكل (1) يوضح مستويات الطاقة للعزل

## 2.1.1-النواقل

هي مواد تكون مقاومتها النوعية للتيار الكهربائي ضعيفة جدا في حدود  $10^{-6} \Omega.Cm$ . تتميز بعدم وجود ثغرة طاقة بين حزمة التكافؤ وحزمة التوصيل, مما يجعلها متداخلين والإلكترونات التكافؤ هي نفسها إلكترونات التوصيل, مما يفسر الاستجابة السريعة للتوصيل الكهربائي بوجود مجال كهربائي الذي يكسبها طاقة إضافية من أجل الانتقال. مثل الحديد, النحاس, الألمنيوم [1.2.4].



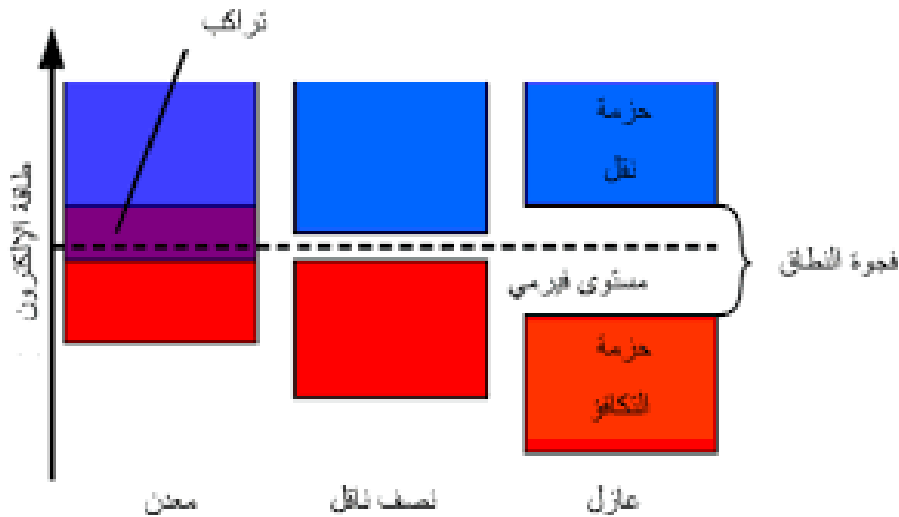
الشكل (2) : يوضح مستويات الطاقة للنواقل

### 3.1.1- أنصاف النواقل

بين المواد العازلة والموصلات توجد مادة ذات أهمية كبيرة هي أشباه الموصلات (أنصاف النواقل) , حيث تكون مقاومتها النوعية الكهربائية اكبر من الموصلات و اقل من العوازل، لها القدرة على إيصال التيار الكهربائي ولكن ليس بكفاءة الموصلات. تكون الثغرة الطاقية صغيرة جدا في حدود (1e.v) وهي تمثل الفرق بين حزمة النقل وحزمة التكافؤ. عند درجة حرارة الصفر المطلق ( $0^0k=-273^0c$ ) تسلك هذه المواد سلوك العوازل وتكون جميع الالكترونات في حزمة التكافؤ بينما حزمة النقل تكون فارغة تماما. عند ارتفاع درجة الحرارة تكتسب الالكترونات طاقة تمكنها من الانتقال من حزمة التكافؤ الى حزمة النقل مما يجعل هذه المواد تصبح موصلة، مثل : السيلكون والجيرمانيوم [ 1،3،5 ] .



الشكل (3): يوضح مستويات الطاقة لشبه الناقل



الشكل (4): يوضح مخططات الطاقة للمواد المختلفة

## 2.1- أنواع أنصاف النواقل

لقد تم تقسيم أنصاف النواقل إلى مجموعتين أساسيتين هما أنصاف النواقل الذاتية وأنصاف النواقل اللاذاتية.

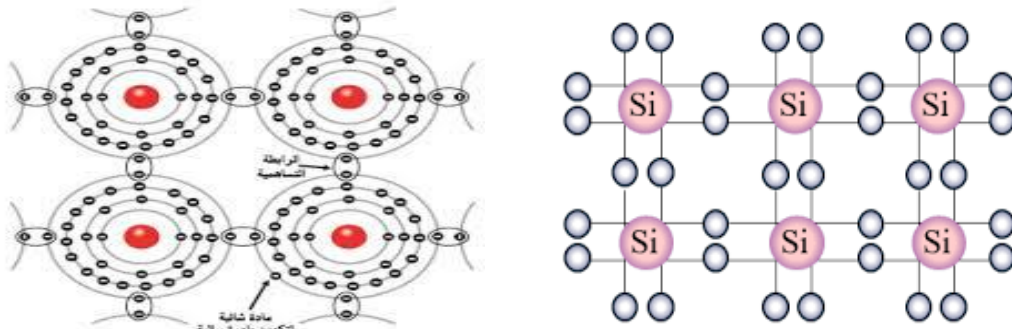
### 1.2.1- أنصاف النواقل الذاتي (الأصلية)

نصف الناقل الذاتي *intrinsic semiconductor* هو نصف ناقل نقي وغير مطعم بشوائب غريبة وخال من العيوب، تكون الثقوب في حزمة التكافؤ هي الفراغات الناجمة عن الإلكترونات التي أثّرت حرارياً إلى عصابة النقل، حيث تركيزهما يكون متساوي على عكس أنصاف النواقل المطعمة. في درجة الصفر المطلق لا يوجد في نصف الناقل الاصيل حاملات شحنة. لكن عندما ترتفع درجة الحرارة تتولد أزواج من الإلكترونات والثقوب نتيجة إثارة إلكترونات حزمة التكافؤ حرارياً عبر فجوة الطاقة الممنوعة إلى حزمة النقل هذه الأزواج من الإلكترونات والثقوب هي حاملات الشحنة الوحيدة في نصف الناقل الأصلي.

من المعلوم ان كل ذرة في الشبكة البلورية للجermanيوم Ge او السيليكون Si او الكربون C محاط بأربع ذرات مجاورة لكل منها أربعة إلكترونات في مدارها الخارجي . وتشارك كل ذرة في هذه البلورة بالإلكترونات الأربعة مع جيرانها الأربعة كما في الشكل (4).

تشكل ذرات السيلكون والجيرمانيوم شكل هندسي دقيق بفضل ترتيبها المنظم لتكوين النسق البلوري لهذه المواد [1-3].





الشكل (5): يوضح الرابط التساهمية لذرة السيلكون والجيرمانيوم

## 2.2.1- أنصاف النواقل اللاذاتية (المطعمة)

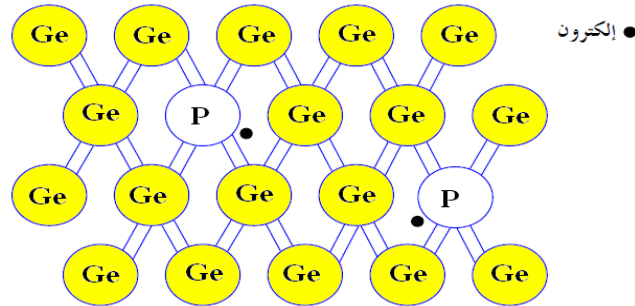
تكمن أهمية التطعيم في الحصول على خواص كهربائية وضوئية جديد لنصف الناقل. وتتم هذه العملية بإضافة كمية محددة وقليل ومتحكم فيها من الشوائب المطعمة المناسبة لنصف الناقل. هذه العملية تكسب الناقل خواص فيزيائية جديدة غير التي كان يمتلكها في الحالة النقية، فعلى سبيل عند تطعيم السليسيوم بالبور  $B$  بنسبة ذرة الى  $10^5$  ذرة سليسيوم تتضاعف الناقلية الكهربائية ب  $10^3$  مرة وينتج عن عملية التطعيم تغير في تراكيز حاملات الشحنة الموجبة والسالبة وتغلب إحداها عن الأخرى بعد أن كانا متساويان في الحالة النقية . بمعنى أنه نتيجة التطعيم سيكون تركيز الالكترونات في عصابة النقل  $C_B$  اكبر من تركيز الثقوب في عصابة التكافؤ  $V_B$  أو العكس، وهذا على حسب نوع التطعيم .

الشوائب المستخدمة في التطعيم هي ذرات خماسية التكافؤ أو ثلاثية التكافؤ و تكون ضئيلة جدا بالنسبة لذرات المادة نصف الناقل مما يجعلها تحافظ على خواصها الفيزيائية والكيميائية ولكن الخاصية الكهربائية تتغير تغير كبير. تعتبر هذه التقنية (التطعيم) أكثر انتشار لتغيير الناقلية النوعية لأنصاف النواقل، وعليه فإن نصف الناقل اللاذاتي هو نصف ناقل مطعم بشوائب معينة قادرة على تعديل عميق في الخاصية الكهربائية يجعلها مناسبة للتطبيقات الالكترونية (مثل الديودات الترانزيستورات وما إلى ذلك) أو التطبيقات الكتروبصرية (مصادر الضوء أو كاشفات). وبالتطعيم يمكن تغير نوع حامل الشحنة المسيطرة في عملية النقل الكهربائي بحيث تكون اما ثقوب أو الالكترونات .

وينتج عن عملية التطعيم نوعان من أنصاف النواقل المطعمة نصف نقل سالبة  $n$  ونصف ناقل موجب  $p$  [2,6,4]

### 1.2.2.1- نصف الناقل من النوع $n$

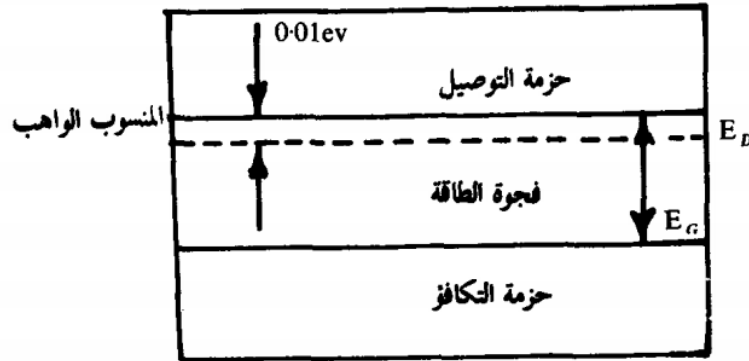
رأينا فيما سبق إن حاملات التيار في أشباه الموصلات الذاتية هي الالكترونات والثقوب إما في هذا النوع من أشباه الموصلات فإن الحاملات الأغلبية للتيار  $majority carriers$  هي الالكترونات الناتجة من إدخال ذرات مطعمة خماسية التكافؤ كذرة الفسفور  $P$  مثلا. يوجد في هذه الذرة خمسة الكترونات في مدارها الخارجي بينما تحوي ذرة الجيرمانيوم على أربعة الكترونات خارجية وعندما تحل ذرة فسفور  $P$  محل ذرة جيرمانيوم في بلورة الجيرمانيوم فإن أربعة الكترونات خارجية من ذرة الفسفور تساهم بأربعة روابط تساهمية مع ذرات الجيرمانيوم المجاورة ويبقى الالكترون الخامس لذرة الفسفور معلقا بالذرة الام ومرتبطا بها ارتباطا ضعيفا دون ان يدخل ضمن الروابط التي تربط الذرات [10,11,6,4,2].



الشكل (6) : يوضح التطعيم من النوع السالب وتحرير الإلكترون

ونتيجة هذا الارتباط الضعيف فإن الطاقة اللازمة لتحرره (الطاقة الأيونية) تكون ضعيفة أمام  $E_g$  (فمثل عند حالة الجيرمانيوم طاقة تأين  $0.0127\text{ev}$  و  $E_g=0.066\text{ev}$ ). يكون المستوى الطاقوي للمناخات قريب جدا من قعر عتبة النقل. فعملية تطعيم نصف الناقل بذرات مانحة ينتج عنه حالات مشغولة بالالكترونات داخل الحزمة الممنوعة مستواها الطاقوي يكون قريب من حزمة النقل، حيث تنقل له بمجرد إثارتها بطاقة تعادل طاقة التأين كما يبينه الشكل (7). هذا الانتقال يؤدي إلى ظهور الكترونات الفائضة في حزمة التوصيل ليقابلها ثقوب في حزمة التكافؤ. فهذه الالكترونات لا تنقل من حزمة التكافؤ كما يحدث ذلك في المادة النقية بل إنها تنتقل من مستويات طاقة واقعة تحت حافة حزمة التوصيل (ضمن فجوة الطاقة) وعلى عمق قليل جدا من الطاقة

( 0.01ev أو 0.04ev). يدعى نصف الناقل المطعم بعناصر العمود الخامس بنصف الناقل من النوع N [10,11,6,4,2].



الشكل (7): يوضح مستوى المنحآت وانتقال هذه الالكترونات بعد إثارتها

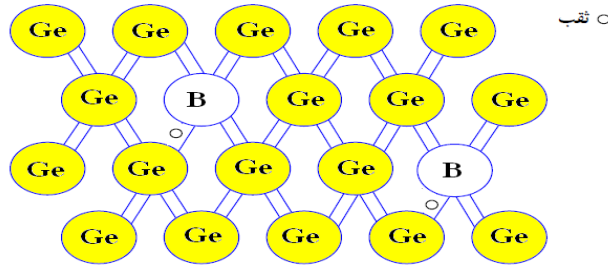
الجدول(1): يبين قيم مقدار طاقة التأين المقدر بـ eV لبعض المطعمات المانحة

	P	As	Sb
طاقة التأين الجرمانيوم	0.012	0.0127	0.096

### 2.2.2.1- نصف الناقل من النوع P

هو نصف ناقل ذاتي كالسيليكون أو الجرمانيوم, ادخلت فيه ذرات من العمود الثالث في الجدول الدوري للعناصر (كالبور B أو الإنديوم In أو الغاليوم Ga أو الألمنيوم Al). عند اشابة الجيرمانيوم بشائبة ثلاثية التكافؤ كالألومنيوم (Al) مثلا, فان الكترولونات التكافؤ الثلاثة فيها تساهم بالرابعة التكافؤية وتبقى رابطة واحدة غير مكتملة. تستطيع هذه الرابطة غير المكتملة بقدر ضعيل من الطاقة إن تنتقل إلى ذرات أخرى عندما تتبادل الكترولونات الرابطة مواضعها, أي عندما تثار الكترولونات في عصابة التكافؤ لتماماً الرابطة مخلفة ورائها ثقباً في حزمة التكافؤ. تسمى الذرة الشائبة من العمود الثالث التي تأخذ الكترولونات من عصابة التكافؤ بالاخذة أو المتقبل acceptor. تشكل ذرات العمود الثالث شوائب اخذة في كل من Ge و Si. ان عملية التطعيم بالشوائب الاخذة تتيح الحصول على نصف ناقل تركيز الثقوب في حزمة التكافؤ فيه أكبر بكثير من تركيز الكترولونات في حزمة النقل, وبذلك

تشكل الثقوب فيه حاملات الشحنة الأكثرية , بينما تشكل الالكترونات الحاملات الأقلية . يسمى نصف الناقل المطعم بهذه الطريقة نصف ناقل من النوع p .



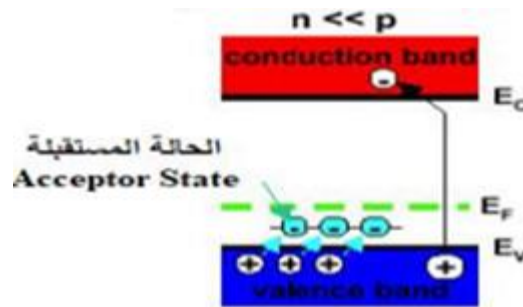
الشكل (8) :يوضح التطعيم من النوع الموجب وتحرير الثقوب

الجدول يوضح طاقة التأين لبعض الشوائب الآخذة في الجيرمانيوم

الجدول (2) : يبين طاقة التأين المقدرة ب eV لبعض الشوائب الآخذة

	B	Ga	In
طرق التأين في الجيرمانيوم	0.0104	0.0108	0.0112

إن تطعيم نصف الناقل بمطعمات الآخذة عنه حالات ممكنة الانشغال بالالكترونات دخل العصابة الممنوعة , يدعى بمستوى الآخذات , يكون قريبة من عصابة التكافؤ حيث تنقل له الالكترونات من عصابة التكافؤ مختلفة ثقوباً في العصابة , بمجرد إثارته بطاقة تعادل طاقة التأين كما بينه الشكل [11,10,6,2,1].



الشكل (9) يوضح المستويات الطاقوي للآخذات داخل المستوي الممنوع

### 3.1- طرق التطعيم

هناك طريقتان أكثر استعمالاً لتطعيم أنصاف النواقل هما طريقة الانتشار الحراري الذي ستقتصر الدراسة عليه وطريقة الغرس الأيوني .

#### 1.3.1- طريقة الإنتشار

هناك مجالين مميزان يتم فيهما الإنتشار هما:

مجال الإنتشار الذاتي: يكون تركيز الشوائب في هذا المجال مهملاً بالمقارنة , مع حاملات الشحنة الذاتية ويكون

$$n=n_i$$

مجال الإنتشار اللا ذاتي : في هذا المجال يكون تركيز الشوائب معتبراً بمقارنة بتركيز الحاملات الذاتية وهذا يحصل

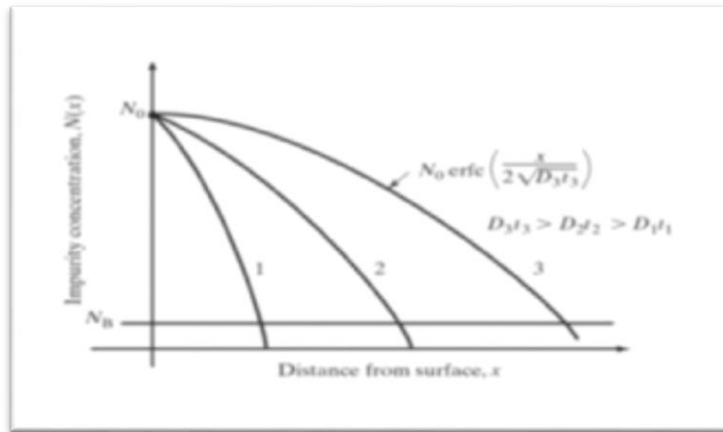
عندما تكون العينة مشابهة بقدر كبير [11]

وفي هذا الطريق يتم التطعيم وفق مرحلتين

التموضع المسبق : يتم إبقاء صفائح الجيرمانيوم في وسط مشبع بالشوائب المطعمة وبتكرير ثابت لمدة زمنية معينة

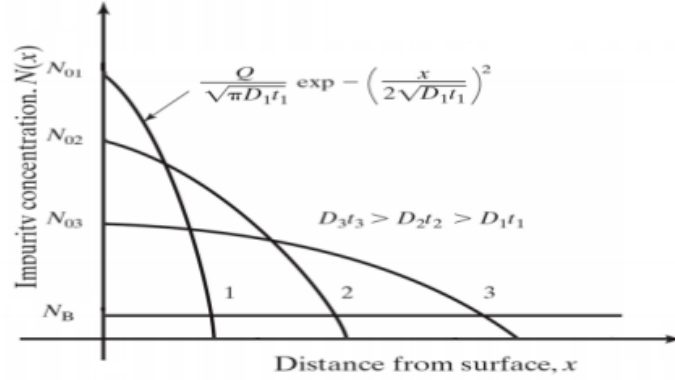
وتحت درجة حرارة ثابتة . يحدث الانتشار على أعماق صغيرة مقارنة بسمك الصفائح المادة النصف ناقلة [11]

الشكل (10) بين منحنيات انتشار في الشروط الذاتية في حالة التموضع المسبق :



الشكل (10) : منحنيات الانتشار خلال مرحلة التموضع

مرحلة التوزيع: تسمح هذه المرحلة بتوزيع الذرات المطعمة داخل المادة نصف الناقل، حيث يقطع منبع الإشابة عن صفائح الجيرمانيوم ويتم اخضاعها إلى درجات حرارة عالية لكي تصل الشوائب المطعمة إلى عمق أكبر. تكون منحنيات الانتشار في الشروط الذاتية كما هو مبين في الشكل (11)



الشكل (11):مرحلة الانتشار الذاتي لمرحلة التوزيع

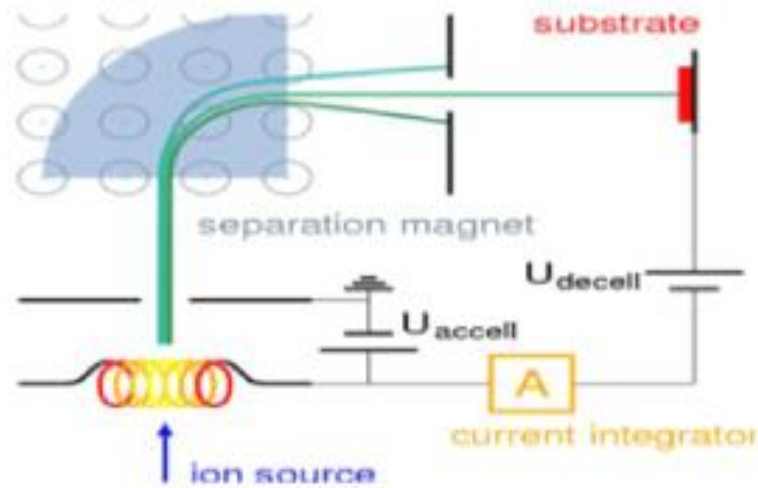
### 2.3.1- طريقة الغرس الأيوني

بدأت الدراسات حول فاعلية تقنية الغرس الأيوني سنة 1900، وتم تفيذه سنة 1951 عن طريق العالم Schokly وهو أحد مخترعي الترانزيستور. تعتمد هذه التقنية على إدخال كمية من الشوائب المطعمة عن طريق القذف العينة المراد تطعيمها بحزمة من الأيونات مسرعة وموجهة بواسطة حقل كهرومغناطيسي. هذه الأيونات تكون شابة، ومختارة مزودة بطاقة حركية (تترواح بين بضعة Kev إلى أكثر من 1Mev) من خلال تسريع أيونات المطعرات المراد اضافتها في مجال كهربائي وصدمة على جسم سطح الصلب. هذه الطاقة تجعل من المطعرات تنفذ داخل بلورة شبه ناقل المراد تشويبه على بعض المسافات (سمك صغير جدا).

تقوم الأيونات الصادمة بنقل الطاقة إلى الكترولونات وأيونات المادة الهدف مما يسهم في حدوث تغيير في تركيب البنيوي للمادة الصلب نتيجة لحدوث سلسلة من التصادمات دخل المادة. الطريقة التي أدخلت بها الأيونات إلى الصلب تلحق ضرار كبيرا بسطحه وتجعل العديد منها (من الأيونات) يحتل موضع غير مناسبة غير استعاضية وبالتالي سيكون وجودها غير فعال كهربائيا. لذلك فإن عملية الزرع الأيوني تتطلب تتلى بمعالجة حراري حتى

تأخذ الذرات الموضع المناسبة وتنقص تلك الاهتزازات وتسمى العملية هذه العملية بالتحمية , لذا ينبغي تجنب الحرارة المرتفعة التي تؤدي إلى إنتشار الشوائب داخل الحجم أو تفكيك الجسم وتبخير عناصره الذاتية .

يتألف جهاز الغرس الأيونات بشكل نمطي من مصدر للأيونات , حيث تنتج الأيونات المراد إضافتها , ومن مسرع , جسيمات الذي يقوم بتسريع الأيونات ضمن حقل كهربائي ساكن (إلكتروستاتيكي) إلى سرعات ذات طاقة مرتفعة , حيث مكان اصطدام الأيونات بالجسم الصلب الهدف. غالبا ما يوصل السطح الهدف بجهاز من أجل كشف وتحديد الشحنات المتراكمة من الأيونات المغروسة , مما يمكن من قياس الجرعة المعطاة بشكل مستمر , وإيقاف العملية عند مقدرا الجرعة المرغوب فيها [10,11]



الشكل (12) مخطط الغرس الأيوني

#### 4.1- منبع الشوائب المطعمة

يمكن تصنيف منبع الشوائب المطعمة الى ثلاثة حالات فيزيائية والتي تمثل الحالة الصلبة , السائلة أو الغازية لهذه الشوائب ومن خلال الجدول (3) أدناه يمكن التعرف على أهم المركبات [11]

الجدل (3): يوضح منابع المطعمات

النوع	العنصر	الصيغة	اسم المركب	الحالة
N	الأنتمون	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ثالث أوكسيد الانتمون	الصلبة
N	الأرسونيك	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ثالث أوكسيد الأرسونيك	
N	الفوسفور	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	خامس أوكسيد الفوسفور	
P	البور	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ثالث أوكسيد البور	
P	البور	B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	الديبوران	
N	الأرسونيك	AsH <sub>3</sub>	الأرسين	الغازية
P	الفوسفور	PH <sub>3</sub>	الفوسفين	
	البور	BCl <sub>3</sub>	ثلاثي كلوريد البورين	
N	الفوسفور	POCl <sub>3</sub>	أوكسد كلوريد الفوسفور	السائلة
P	البور	BBr <sub>3</sub>	ثالث بروميد البور	

0



## مراجع الفصل الأول

- [1]- محمد أسعد البعيع ؛ الفيرا الكسندر وفنا الدويري ؛ صفاء توفيق المقبل ، الإلكترونيات ، الطبعة الأول 2004م-1435هـ مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع.
- [2]- الدكتور محمد قعقع ، الألكترونيات الاساسية (الإلكترونيات 1) ، جامعة دمشق كلية العلوم.
- [3]- الدكتور مناف عبد حسين ، فيزياء الحالة الصلبة ، الطبعة لأولى 2006م-1424هـ-مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع عمان.
- [4]- م. مؤيد فايز القواسمة ، أشباه الموصلة ، الطبعة الأولى 2006م-1426هـ ، مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع.
- [5]- بوراس ذكري ، مذكرة مقدمة لنيل شهادة الماستر في الفيزياء تخصص علوم المادة بعنوان الحركة في الآبار الكوانتية لأنصاف النواقل ، جامعة العربي بن مهدي أم البواقي ، 2012/2013م.
- [6]- د. فخري اسماعيل حسن ، الكهرباء واشباه الموصلات ، جامعة قسنطينة ، الطبعة الثانية 1989 ، ديوان المطبوعات الجامعة الجزائر.
- [7]- د. وليد قادري ، موسوعة الفيزياء " الكلاسيكية والحديثة" الطبعة الثالثة 2009 م ، دار أسامة للتوزيع والنشر الأردن - عمان.
- [8]- مصطفى عباس هادي ، محمد حميد مهدي ، دراسة خصائص الأساسية والبصرية والعيوب البلورية ، لأشباه الموصلات ، بحث مقدم الى رئاسة قسم الفيزياء- كلية التربية كجزء من متطلبات نيل شهادة البكلوريوس في الفيزياء ، جامعة القادسية / كلية التربية ، جامعة العراق ، 2007م.
- [9]- وردة بن علي ، صبري بوشول مذكرة التخرج مقدمة لنيل شهادة الماستر أكاديمي بعنوان تحضير الأغشية الرقيقة لكبريتيد الكاديوم (Cds) اللمرسبة بطريقة الحمام الكيميائي (CBD) ، جامعة الشهيد حمه الأخضر الوادي - كلية العلوم الدقيقة - قسم الفيزياء 2017/2018م.
- [10]- هامل عبد الوهاب ، مذكرة لنيل شهادة دكتوراه دولة بعنوان تطوير نموذج السطح المسنن للخلاية الشمسية للحصول على مردود طاقوي عالي ، جامعة باجي مختار عنابة - 2009/2010م.
- [11]- سويقات عبد القادر - أطروحة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه بعنوان دراسة لنصف الناقل الجيرمانيوم المطعمة للإستعمال في مكونات الإلكترونيات الضوئية ، جامعة قاصدي مرباح ورقلة ، 2015/2016 م.

## الفصل الثاني:

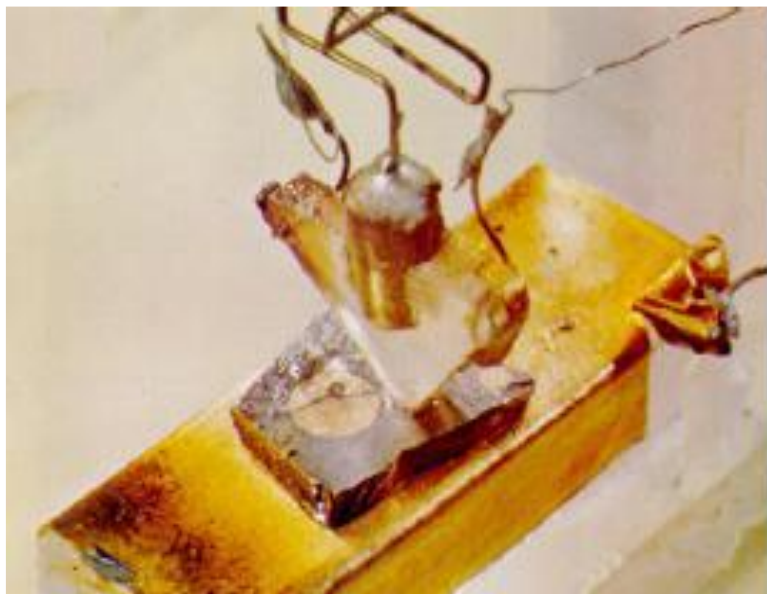
الجير مانيوم ومميزاته

## تمهيد

تطرقنا في الفصل السابق على أنصاف النواقل وما تتميز به . وفي هذا الفصل سوف نتحدث على الجيرمانيوم وتواجده في الطبيعة , واكتشافه وطرق تنقيته , كما سنسلط الضوء على خواصه والمتمثلة في البنية البلورية , الفاصل الطاقوي وتركيز حاملات الشحنة بالإضافة إلى العيوب النقطية فيه مع التطرق إلى تقييم معامل الانتشار الذاتي من خلال بعض الدراسات .

## 1.2- اكتشاف الجيرمانيوم

تنبأ John Newlands في سنة 1864 إلى وجود عنصر وسيط بين السيليكون والقصدير وهذا أثناء إنشاء الجدول الدوري للعناصر الكيميائية , وفي سنة 1871 فكر Dmitri Mendeleev في وجود هذا العنصر حيث حدد موقعه وسماه شبيه السيليكون إلى أن أتى Clemens Winkler الذي استطاع استخلاص العنصر الخام argyrodite وأعطى له اسم الجيرمانيوم في إشارة إلى بلده ألمانيا . بدأ الاستغلال الفعلي للجيرمانيوم في الصناعة مع بداية الحرب العالمية الثانية , حيث طورت آنذاك صمامات ثنائية بغرض استخدامها في الرادارات. جاء بعد ذلك اختراع الترانزستور في 1947 في مختبرات Bell وعدسات الأشعة تحت الحمراء في سنة 1949 [ 1 , 5 ] .



الشكل (13) : أول الترانزستور في مختبرات بيل عام 1948

## 2.2- توجد الجيرمانيوم في الطبيعة

الجرمانيوم هو عنصر شبه معدني رمادي فاتح وهو من أشباه الموصلات التي لها خواص كهربائية بين المعادن والعوازل يقع أسفل السيليسيوم مباشرة في الجدول لماندليف (العمود الرابع) , 14 IVA في الجدول الدوري (عائلة ميتالويد metalloids الشكل (12) , يرمز له بالرمز ( Ge ) , عدده الذري  $Z=32$  لديه الوزن الذري 72.59 الجيرمانيوم الطبيعي هو مزيج من خمسة نظائر مستقرة بنسب مختلف والمتمثلة في :  $Ge^{74}$  (35.94%) ,  $Ge^{72}$  (27.66%) ,  $Ge^{70}$  (21.23%) ,  $Ge^{73}$  (7.73%) ,  $Ge^{76}$  (7.44%) . بالإضافة إلى ذلك , تم تحدد 33 نظيرا مشعا , اثنان منهما لهما نصف عمر مقاس بالأيام , والباقي لها نصف عمر يتراوح بين 20 ملي ثانية و39 ساعة . الجيرمانيوم هو رباعي التكافؤ , لكنه يمتلك سبع حالات أكسدة , منها  $4+$  و  $2+$  الأكثر استقرارا, أما  $-4$  و  $0$  و  $3+$  و  $5+$  أقل استقرارا [1,6,7].

Position du germanium (Ge) dans le tableau périodique des éléments

1	Position du germanium (Ge) dans le tableau périodique des éléments																2	
1	H																	He
2	3	4											5	6	7	8	9	10
	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	11	12											13	14	15	16	17	18
	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
4	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54
	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	55	56	57-71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86
	Cs	Ba	Lanthanides	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	87	88	89-103															
	Fr	Ra	Actinides															
	Lanthanides :																	
	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
	Actinides :																	
	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103			
	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr			

الشكل (14): يوضح موقع الجيرمانيوم في الجدول الدوري

الجدول(4) : يوضح الخواص الفيزيائية للجرمانيوم

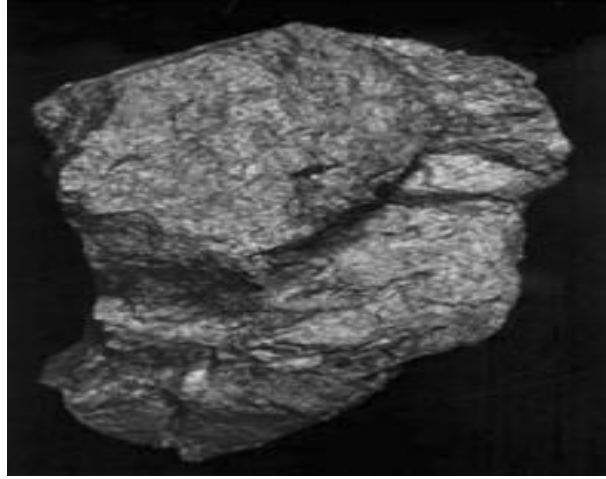
32	العدد الذري
72.64	الكتلة الذرية (u.a)
1.25	نصف القطر الأيوني ( $A^0$ )
938.25	نقطة الانصهار ( $^0C$ )
2833	درجة الغليان ( $^0C$ )
5.32	الكثافة ( $g.cm^{-3}$ )
2.01	الكهربية
16	ثابت العزل
6	الصلابة (MOhs)
مكعب	النظام البلوري
$1,04.10^{19}$	$Nc(cm^{-3})$
$Nv(cm^{-3})$	$Nv(cm^{-3})$
3.97	معامل الانكسار

### 3.2- معادن الجيرمانيوم

يعتبر الجيرمانيوم من العناصر النادر في الطبيعة ( %  $10^{-3}$  من القشرة الأرضية) فهو لا يتواجد نقيا بل ممزوجا في عناصر أخرى بشكل خامات , أغلبها بأكروانيا وروسيا والصين , تستغل هذه الخامات بغية الحصول منها على الجيرمانيوم [3,5]

الجدول (5): بعض خامات الجيرمانيوم

Argutite	GeO2	69.41% Ge
Eyselite	FeGe3O7(OH)	53.91%Ge
Otjisumeite	PbGe4O9	45.27%Ge
Argyrodite	Ag8GeS6	6.44% de Ge
Renierite	Complex of ( Cu/ Fe/ Ge/ As)	7.8%Ge
Germanite	Cu26Fe4Ge4S32	9.10%Ge



الشكل (15) : يوضح معدن رينيريت renierite

## 4.2- تنقية الجيرمانيوم

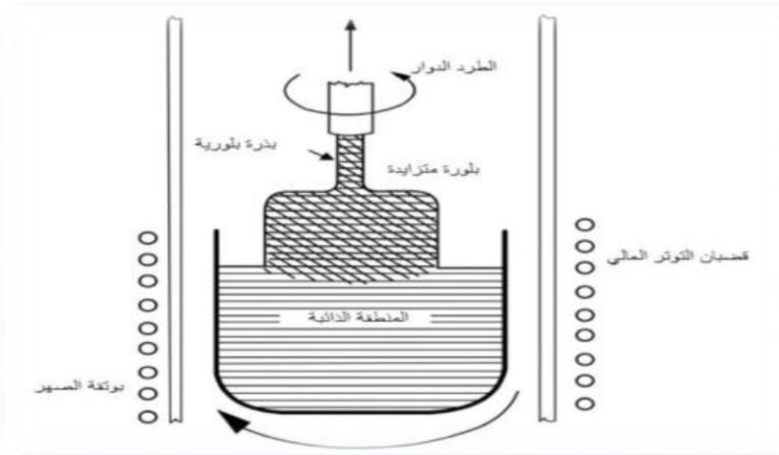
للحصول على سبائك الجيرمانيوم أحادية البلورة وذات دراجة عالية من النقاء . يمكن الاعتماد على طريقة (Cz) ( Czochralski) أو طريق الصهر النطاقي (Fz) Float zone

### 1.4.2- طريقة تشوخرالسكي (Czochralski):

اقترحه العالم البولندي Jan Czochralski , وهي عملية تستخدم في مجال نمو البلورات في علم المواد من أجل الحصول على بلورة أحادي خلال تجربة قياس سرعة تبلور المعادن , وفي سنة 1916 أثبتت أنها مفيدة جدا لتبوير العديد من السبائك [12,11,10,3].

وسنوضح هذه الطريقة أكثر خلال تقنية الجيرمانيوم حيث عند صهره في بوققة داخل الفرن يتم سحبه انطلاقا من الوسط ببطء أحادي البلورية وذلك بالتزامن مع أبقاء البلورة في حالة الدوران من أجل تحقيق تجانس الحمام ومراقبة السطح البيني الصلب السائل . ويتوقف قطر البلورة النامية على درجة حرارة المصهور ومعدل سحب البلورة , حيث يقل قطر البلورة عندما يرتفع معدل سحبها من المصهور , كما يقل إذا ارتفعت درجات حرارة المصهور

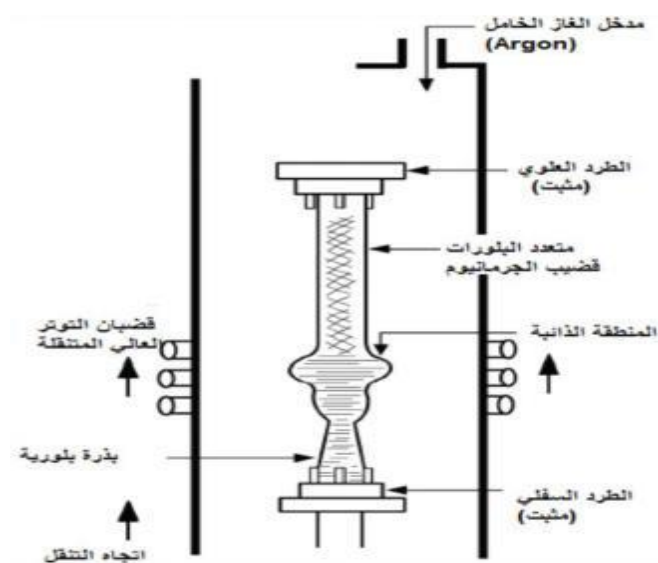
تتميز هذه الطريقة بأن البلورة النامية تكون على درجة عالية من الجودة , كما تمكن من إنشاء بلوريات خالية تقريبا من العيوب البلورية الشائعة عند هذه الطريقة , من بين هذه البلورات الجيرمانيوم [12,11,10,3].



الشكل (16): يوضح طريقة (Czochralski) [5]

## 2.4.2- طريقة الصهر النطاقي (Float zone)

تستخدم تقنية (Fz) للحصول على عنصر الجيرمانيوم عالي النقاوة , وهي مناسبة لإنتاج رقائق صغير مع شوائب منخفضة من الأكسجين , تعتمد هذه الطريقة على الإذابة المحلية لسبيكة متعددة البلورات مع بذرة واحدة ذات اتجاه محدود , توضع في فرن من الغاز الخامل وذلك بإنزالها رأسياً إلى الأسفل ببطء , ويمرر عبر لفائف متنقلة تتغذى بمولد لترددات عالية تبدأ من المنطقة المنصهر وتستمر عند البذرة , تدار السبيكة بسرعة ثابتة لتجنب تقارب المادة من الوسط وكذلك من أجل الحصول على توزيع منظم نحو الخارج, أثناء لانصهار يكون الفرن معبأ بالغاز الخامل مثل الأرجون لخفض الغازات الشائبة والحصول على سبيكة أحادية البلورة



الشكل (17): يوضح طريقة الصهر النطاقي [5]



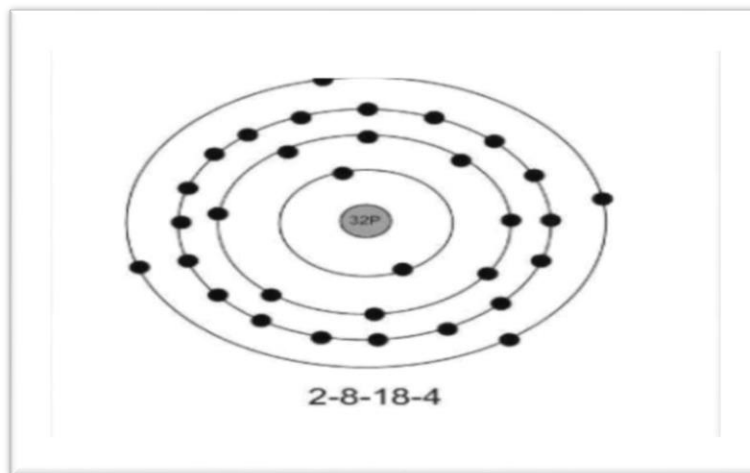
الشكل(18): جرمانيوم أحادي البلورة [2]

## 5.2- البنية البلورية

نعلم أن المادة تتكون من ذرات ، وبأن الذرة تحتوي على نواة تحيط بها هالة من الإلكترونات ، وإذا فحصنا ذرة الجيرمانيوم منفردة سنجد أنها تحتوي على نواة بها 32 بروتون ، عندما تكون الذرة في الحالة العادية Normal state أنه سيكون بها إلكترون تدور حول النواة . إن هذه لإلكترونات الدوارة حول النواة تتوزع بنمط ثابت :

$2n^2, 18, 8, 2, \dots, 2n^2$  وتتمل الأغلفة Shells المحيطة بالنواة . حيث  $n$  تمثل عدد

الأغلفة [9]

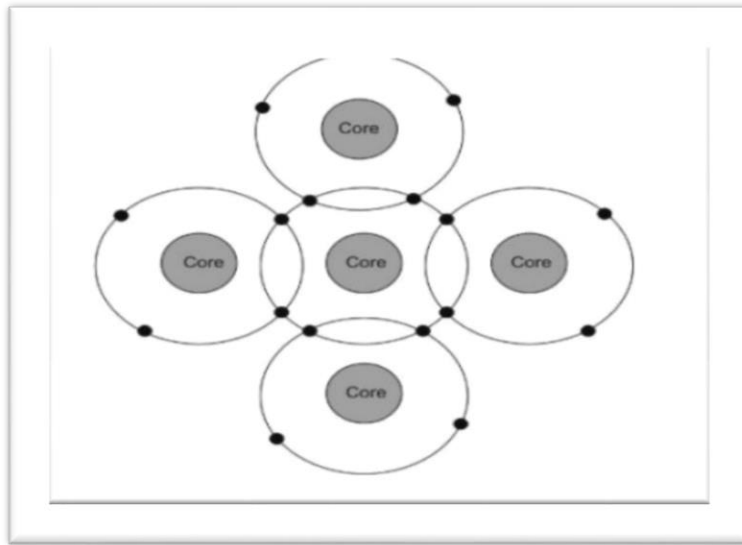


الشكل(19): يوضح ذرة الجيرمانيوم



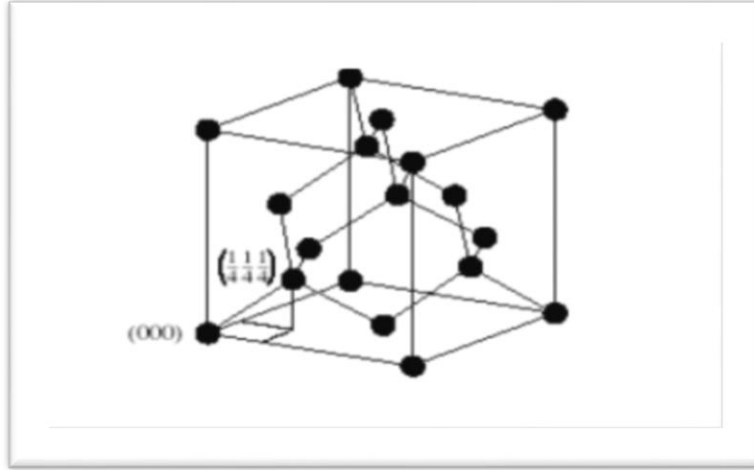
## 1.5.2- التكوين البلورة

بما أن الغلاف الخارجي لذرة الجيرمانيوم يحتوي على أربعة إلكترونات , فهذا يعني الغلاف ينقصه أربعة إلكترونات حتى يصل الى حالة التشبع (8 إلكترونات) . ومن حقيقة أن ذرات الجيرمانيوم أثناء ارتباطها لتكوين المادة فإن غلافها الخارجي سيحتوي على ثمانية إلكترونات , فإن أربعة من هذه الثمانية ستكون إلكترونات تساهمي من الذرات الأربعة المجاورة . هذه الترتيب للذرات المجاورة يدعى بالتكوين البلوري . في بلورة الجيرمانيوم النقي تكون كل ذرة محاطة بأربعة ذرات مجاورة والتي في الحقيقة تشارك بالإلكترونات مع الذرة المركزية [9] كما هو مبين في الشكل (20)



الشكل(20): يوضح الذرات داخل البلورة

يتبلور الجيرمانيوم هيكل الماس المكعب المرتبط تساهمي كما هو موضح في الشكل (21). تتكون الشبكة البلورية من شبكتين مكعبتين متمركزتي الأوجه (CFC) - Face cubic centred ومتداخلتين بحيث تكون منهما مزاحة في اتجاه قطر الخلية المكعبة بمقدار ربع (1/4) طول القطر . ويمكن إعتبارها شبكية مكعبة متمركزة الأوجه ولها قاعدتان , إحداها عند نقطة الأصل (0, 0, 0), والأخرى حيث ثابت الشبكة  $a=5.66 \text{ \AA}$  كل خلية أولية لشبكة الماس تحتوي على 8 ذرات , ويحيط بكل ذرة أربعة ذرات (رقم التناقس) مرتبطة مع بعضها بروابط تكافؤية [3,5,8,10].



الشكل(21): رسم تخطيطي يوضح البنية البلورية للجرمانيوم

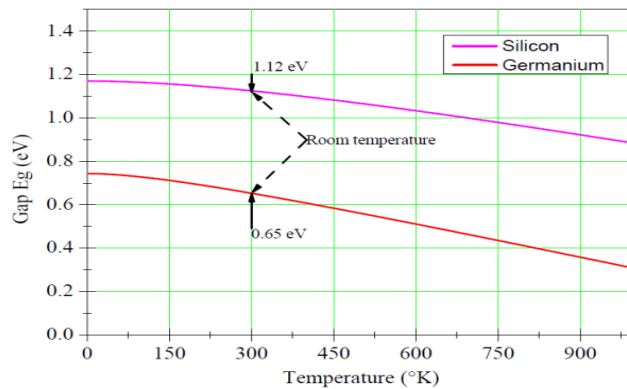
## 6.2- الفصل الطاقوي للجرمانيوم

يقدر الفاصل الطاقة  $E_g$  (الفرق بين الطاقة الصغرى لشريط الناقل  $BC$  والطاقة العظمى لشريط التكافؤ  $Bv$ ) في الجرمانيوم ب  $0.66\text{ eV}$  عند  $300\text{ k}^0$ , الأمر الذي يجعله قارئ جيد للإشارات التي أطوالها موجاتها محصورة بين  $1.3-1.55$  ميكرومتر, ويؤمن بذلك الوساطة بين المكونات الإلكترونية الضوئية والميكرو إلكترونية العاملة في هذا مجال الاتصالات [3].

يتغير الفاصل الطاقوي للجرمانيوم بدلالة درجة الحرارة وفق العلاقة التالية:

$$(1.2) E_g(\text{eV}) = 0.742 - 4.8 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T+235}$$

الشكل(21) يوضح مقارنة بين تغيرات الفاصل الطاقوي للجرمانيوم والفاصل الطاقوي للسليسيوم بدلالة درجة الحرارة .



الشكل(22): مقارنة بين تغيرات الفاصل الطاقوي للجرمانيوم والسليسيوم بدلالة درجة الحرارة

## 7.2- تركيز حاملات الشحنة الذاتية

معرفة كثافة حاملات الشحنة في نصف الناقل يعد ضروريا لمعرفة خواص الكهربائية . في نصف الناقل تحدث عملية معاكسة لعملية الإثارة الحرارية للالكترونات المنقلة من عصابة النقل  $B_c$  تتحد مع الثقوب في عصابة التكافؤ  $B_v$  مما يؤدي إلى خفض ناقلية النصف الناقل . تكون احتمالية الاتحاد متناسبة مع عدد الالكترونات الحرة في  $B_c$  وعدد الثقوب الحرة في  $B_v$  . عند درجة حرارة  $T$  لاويين عمليتي الإثارة والاتحاد توجد حالة توازن ينتج عنها تركيز معين لحاملات الشحنة تعطى وفق العلاقات التالية [3,14,16]

$$(2.2) n = N_c \exp \left[ -\frac{E_c - E_F}{KT} \right]$$

$$n = N_v \exp \left[ -\frac{E_F - E_v}{KT} \right] \quad (3.2)$$

ومن قانون الكتلة نجد :

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (4.2)$$

وفي الحالة الذاتية تكون :

$$n = p = n_i \quad (5.2)$$

ومن خلال العلاقات السابقة تركيز حاملات الشحنة الذاتية  $n_i$  (كثافة حاملات الشحنة الذاتية في النصف الناقل النقي) تكون كالتالي :

$$(6.2) n = \sqrt{N_c \cdot N_v} \left[ -\frac{E_g}{2kT} \right]$$

$N_v, N_c$  تمثلان على الترتيب الكثافة الفعالة للالكترونات في عصابة النقل والكثافة الفعالة للثقوب في عصابة التكافؤ .

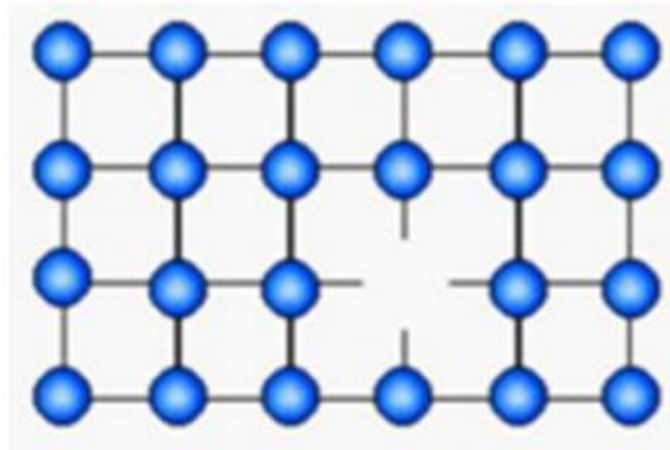
تعطى كثافة حاملات الشحنة الذاتية للجرمانيوم وفق العلاقة التالية :

$$n_i (cm^{-3}) = \sqrt{3.10 \times 10^{22} T^3 \exp \left[ -\frac{0.785}{KT} \right]} \quad (7.2)$$

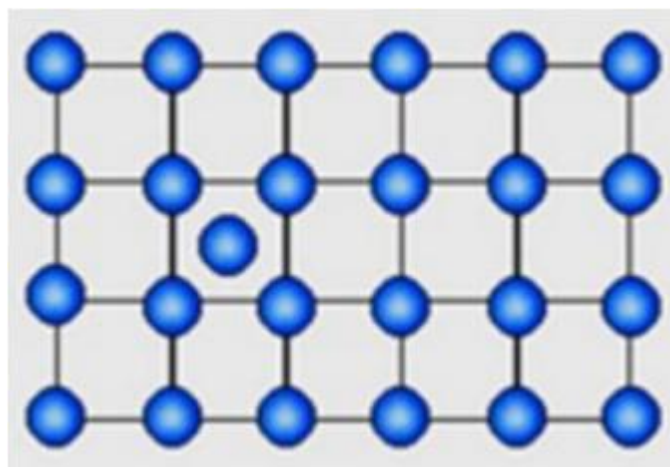
## 8.2- العيوب النقطية للجرمانيوم

في الحقيقة لا وجود لبلورة مثالية في الطبيعة. فكل بلورة لها عيوب وأن كانت قليلة, والعيوب البلورية بالنسبة للمواد الصلبة إختلال في استمرارية تركيب الذرات وذلك لعدة عوامل منها الحرارة. وابتسط أنواع العيوب هي العيوب النقطية [17,3].

في اليرمانيوم نميز نوعين أساسيين من العيوب النقطية يلعبان الدور الرئيس في الانتقال انتقال المطعومات داخل المنظمة البلورية للجرمانيوم. الأول هو الفجوة (vacancy) والتي يرمز لها بالرمز V وتظهر نتيجة غياب ذرة جيرمانيوم عن موضعها الشبكة البلورية المثالية. العيب الثاني يتمثل البنية الذاتية (Self-interstitial) وهي عبارة ذرة جيرمانيوم منحرف عن موضوعها ومنغرس في موضع بيني من الشبكة البلورية للجرمانيوم [3].



الشكل(23): يوضح تواجد الفجوة داخل الشبكة البلورية



الشكل(24): يوضح تواجد البنية الذاتية داخل الشبكة البلورية

## 1.8.2- تركيز العيوب في حالة التوازن

يستند التفسير الفيزيائي لشيء العيوب البلورية النقطية لقواعد الديناميكا الحرارية. يعزى السبب الأساسي في التبلور على مادة معينة بتركيب بلوري معين الى كون الطاقة الحرة Free Energy المحققة التوازن الديناميكي تكون أصغر [3,18].

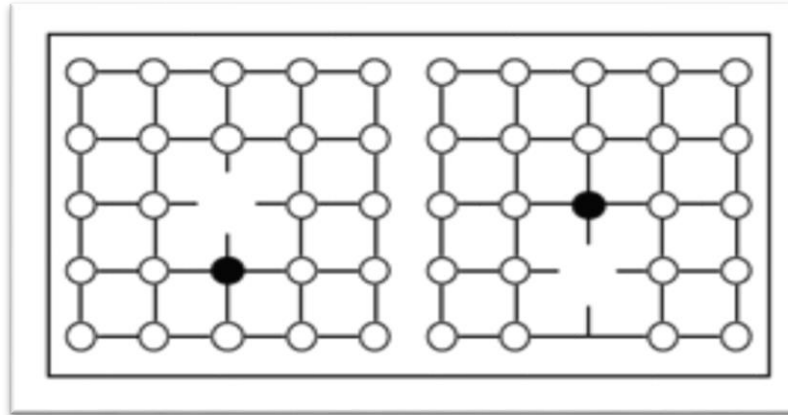
ويكون تركيز العيب النقطي  $C_x$  في حالة التوازن التيرموديناميكي :

$$C_x = C_s \exp \left[ \frac{\Delta G_x^f}{KT} \right] \quad (8.2)$$

حيث  $C_s$  ,  $\Delta G_x^f$  هما على الترتيب كثافة المواقع في الشبكة البلورية والطاقة الحرة لتشكيل العيب النقطي. إن العيوب النقطية لها أهمية بالغة من وجه النظر التكنولوجية والعلمية لدورها في تخفيض المطعومات على الانتشار أثناء عملية تطعيم نصف ناقل.

## 9.2- آلية انتشار المجهري للفسفور في الجيرمانيوم :

ينتشر الفسفور في الجيرمانيوم وفق آلية الفجوية (vacancy mechanism) , يعتمد هذا الانتشار على وجود الفجوة (الشكل). بوجود فجوة أحد مواضع الأقرب تنتقل المطعة المتواجدة في الموقع الاستبدالي الى الموقع المجاور. تعرف هذه آلية بالتبديل البسيط. في حالة وجود قوة تجاذب بين المطعة والفجوة يبقيان مرتبطان مع بعضهما البعض ويشكلان ثنائية فجوة - مطعمة. هذه الثنائية تنتقل كمركب واحد في الشبكة البلورية وهو ما يدعى بالانتشار الثنائيات [3].



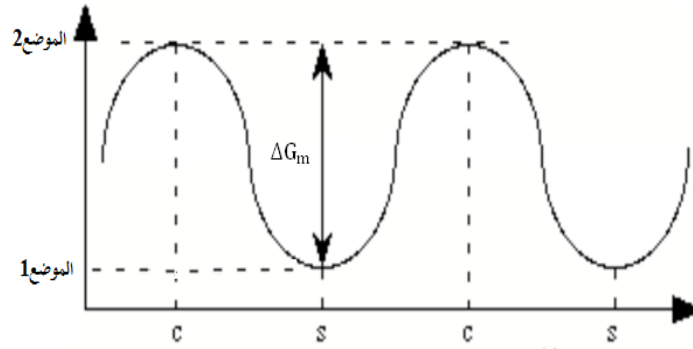
الشكل(25): يبرز مخطط الآلية الفجوة

## 10.2- معامل الانتشار الذاتي

يعتبر معامل الانتشار مقدار مميز لظاهرة انتشار المادة. معامل انتشار الذاتي مرتبط بحالة الانتشار في المجال الذاتي لأنصاف النواقل. يكون لانتشار ذاتيا في حالة ما يكون تركيز المطعمة المنتشر مهملا, ويكون تركيز الالكترونات في مستوى النقل للنصف النقل للنصف الناقل مساويا لتركيز حاملات الشحنة الذاتية  $n_i$  [3].

### 1.10.2- الدراسة النظرية معامل الانتشار :

عند انتقال الفرد المنتشر الموضع 1 إلى الموضع 2 يحدث تغير في طاقته الحرة مقدرها  $\Delta G_m = G_2 - G_1$ , حيث  $G_1$  و  $G_2$  هما الترتيب الطاقة الحرة للفرد المنتشر في الموضع الأول والموضع الثاني



الشكل(26): الحاجز الكموني أثناء الانتقال من موضع إلى آخر

$\Delta G_m$  الطاقة اللازمة لاجتياز الحاجز للوصول للموضع 2 الشكل

يرتبط معامل الانتشار في حالة كون الانتشار يكون محفزا بالفجوات , بتواتر القفز  $V$  بالعلاقة [19,20,21]:

$$D = f \cdot \frac{1}{6} a^2 \cdot v \quad (9,2)$$

يمثل  $a$  بعد الجوار الأقرب و  $f$  ومعامل الارتباط  $V$  و توتر القفز

حيث تواتر القفز :

$$V = V_v \cdot P_v \quad (10.2)$$

$V_v$  تواتر القفز للفجوة ويساوي :

$$V_v = V_0 \exp \left[ \frac{\Delta G_v^m}{KT} \right] \quad (11.2)$$

$P_v$  هي احتمال وجود فجوة في الموضع المجاور :

$$P_v = Z \cdot \frac{C}{C_s} \exp \left[ -\frac{\Delta E_{AV}}{KT} \right] \quad (10.2)$$

في العلاقتين (3.3) و(4.3) تمثل  $\Delta G_v^m$  طاقة هجرة الفجوة :

$E_{AV}$  تمثل طاقة الارتباط بين الفرد المنتشر والفجوة

$C_s$  كثافة الموقع في الشبكة البلورية

$Z$  الجوار عدد الأقرب, ( $Z = 4$ ) بالنسبة للبيئة الماسية

$C$  تركيز الفجوة عند التوازن التيرموديناميكي وتعطى بالعلاقة التالية:

$$c_x = c_s \exp \left[ -\frac{\Delta G_x^f}{KT} \right] \quad (13.2)$$

إنطلاقاً من العلاقات السابقة نحصل على مايلي:

$$v = z v_0 \exp \left[ \frac{\Delta G_x^m}{KT} \right] \exp \left[ -\frac{\Delta G_x^f - E_{AX}}{KT} \right] \quad (14.2)$$

$$v = z v_0 \exp \left[ -\frac{\Delta G_x^f + \Delta G_x^m - E_{AX}}{KT} \right] \quad (15.2)$$

عندما يكتب معامل الانتشار على النحو التالي :

$$D = f \cdot \frac{4}{6} a^2 v_0 \exp \left[ -\frac{\Delta G_x^f - \Delta G_x^m - E_{AX}}{KT} \right] \quad (16.2)$$

$$D = f \cdot \frac{4}{6} a^2 v_0 \exp \left[ -\frac{\Delta S_x^f + \Delta S_x^m}{T} \right] \exp \left[ -\frac{\Delta G_x^f - \Delta G_x^m - E_{AX}}{KT} \right] \quad (15.2)$$

تمثيل:  $\Delta H_x^m$  انطالي هجرة العيب النطقي

$\Delta S_s^m$  انطروي هجرة العيب النطقي

$\Delta H_x^f$  انطالي تكون العيب النطقي

$\Delta S_s^f$  انطروي تكون العيب النطقي

وتكون عبارة معامل الانتشار من الشكل :

$$D = D_0 \exp \left[ -\frac{E}{KT} \right] \quad (18.2)$$

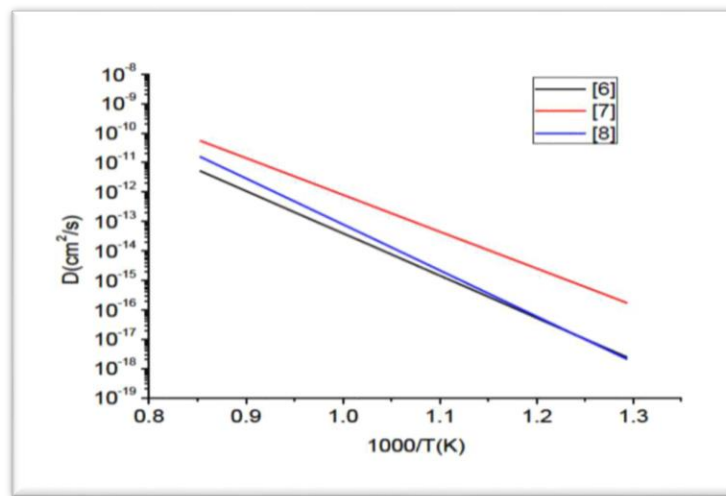
يسمى  $D_0$  الحد الأنطرويبي و  $E$  طاقة التنشيط حيث :

$$E = \Delta H_x^f + \Delta H_x^m - E_{AX} \quad (19.2)$$

يمثل المحنى البياني الممثل لتغيرات  $\log D = f\left(\frac{1}{T}\right)$  خطا مستقيم ميله  $-E/K$  ونقطة تقاطعه مع محور الترتيب  $\log L(D_0)$ .

### 11.2- معامل انتشار الفسفور في الجيرمانيوم :

هناك دراسة عديد تناولت البحث عن كيفية تغير معامل الانتشار الفسفور في الجيرمانيوم بدلالة درجة الحرارة واستنتاج تنشيط  $E$  و الحد الأنطرويبي  $D_0$  كما هو مبين في الجدول أدناه :



الشكل (27): يمثل تغيرات معامل انتشار P في الجيرمانيوم حسب المراجع المذكورة

الجدول (7) يمثل قيم حد الأنطرويبي P وطاقة تنشيط في الجيرمانيوم

المطعمة	$D_0(\text{cm}^2\text{s}^{-1})$	$E(\text{eV})$	المرجع
P	2.5	2.48	[6]
P	330	2.13	[7]
P	9.1	2.85	[8]



## مراجع الفصل الثاني

- [1] Mineral Commodity Profiles Germanium – By W.C. Butterman and John D. Jorgenson – U.S. Geological Survey, Reston, Virginia 2005
- [2] Cor Claeys , Eddy Simoen , " Germanium–Based Technologies : From materials to devices " , edition bc. Claeys and E. smoen. Elsevier, Amsterdam.2007.
- [3] عبد القادر سوقيات , أطروحة لنيل شهادة نيل الدكتوراه بعنوان دراسة لنصف الناقل الجيرمانيوم المطعم للإستعمال المكونات الإلكترونية الضوئية, الجزائر – ورقة 2016/2015م
- [4] Christmann .P, et all, "panorama mondial 2010 du germanium" ,BRGM/RP,2011
- [5] ابن بادة خولة , مذكرة لنيل شهادة الماستر ل.م.د بعنوان دراسة المحاكاة الانتشار الفسفور في الجيرمانيوم , جامعة قاصدي مرباح – ورقة, 2018/ 2019 م.
- [6] Fiche de synthèse sur la criticité des métaux – Le germanium – Novembre 2015
- [7] Julien Bonnet ,Docteur de l’Université de Lorraine (Nancy) en Géosciences , Thèse Présentée pour l’obtention du titre de : Distribution et contrôle cristallographique des éléments Ge, Ga et Cd dans les sphalérites des gisements de type Mississippi Valley dans les districts de Central et East Tennessee, USA décembre 2014
- [8]SEKKAL ABD-EL-DJALIL ، Mémoire Pour L’OBTENTION DU un DIPLÔME DE Master en physique s'intitulé Etude de la réponse d’un détecteur à semi-conducteur germanium hyper pure Application à la spectrométrie des rayons gamma ، Université de KASDI MERBAH – OUARGLA 2018
- [9]malvino,ترجمة أسامي العشي , الفصل الأول من كتاب تقريبات دوائر الترانزيستور, مكتبة أسامة العشي , الطبعة الثانية
- [10] أ.د.نعيمة عبد القادر أحمد –أ.د.محمد أمين سليمان ,علم البلورات و الأشعة السينة دار الفكر العربي ,مصر , أول طبعة الأولى 1426هـ/2005م

- [11]E. Talik and M. Oboz , " Czochralski Method for Crystal Growth ofug Reactive Itermetallics" , Institute of Physics , University of Silesia , Poland ,2013.
- [12]D.Cochet-Muchy," Growth of piezoelectric crystals by czochralski method " , journal de physique IV , jpa-00252473.1994
- [13]T. Taishi ,et all,"Improved Czochralski Growth of Germanium Single Crystals from a Melt Covered by Boron Oxide",ACTA PHYSICA POLONICA A. 124(2),231 (2013)
- [14] -الدكتور محمد فقعع , الإلكترونيات الأساسية (الألكترونات 1 ) , جامعة دمشق كلية العلوم .
- [15]عبد القادر سويقات , مذكرة مقدمة لنيل الماجستير بعنوان نمذجة ومحاكاة إنتشار المطعمة في السلسيوم والجرمانيوم أحادي البلورة , جامعة قاصدي مرباح ورقلة , 2012م
- [16]A. Bouchekka. these de doctorat,"Adsorption of BSA Protein on silicon,Germanium and Titanium Dioxide Investigated by In Situ ATR-IR Spectroscopy " , université d'oran (2013)
- [17]هامل عبد الوهاب , مذكرة مقدمة لنيل شاهدة الدكتوراة دولة بعنوان تطوير نمذج السطح المسنن للخلايا الشمسية للحصول على مردود طاقوي عالي جامعة باجي مختار -عنابة 2010/2009م
- [18]د.سعود بن حميد اللحياني , فيزياء الجوامد , جامعة أم القرى , كلية العلوم التطبيقية, شعبة فيزياء الطبية
- [19]Mehdi Bazizi : «Modélisation physique et simulation de défauts étendus et diffusion des dopants dans le Si, SOI et SiGe pour les MOS avancés», Thèses Doctorat de L'université' de Toulouse (2010).
- [20]Scoten W.Jones: « Diffusion in Silicon », IC Knowledge LLC, copyright (2000).
- [21]AliM.Mousa and Raid A.Ismail: « Analysis of dopant diffusion in Molten Germanium induced by pulsed ND: Yag Laser »,Qatar Univ.Sci.j. **15** (2):301-306(1995).
- [22] B.Boltaks: « Diffusion et Défauts Ponctuels Dans Les Semi-conducteurs », Page(119,181) , Editions Mir. Moscou, (1977).
- [23] S. Brotzmann and H. Bracht: « Intrinsic and extrinsic diffusion of phosphorus, arsenic, and antimony in germanium», Appl. Phys. **103**, 033508 (2008).
- [24] P. Laitinen: « Self- and impurity diffusion in intrinsic relaxed silicon Germanium », thèse dedoctorat, Université de Jyväskylä, Finlande (2004).

## الفصل الثالث:

نمذجة ومحاكاة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم

تمهيد :

في هذا الفصل نمذجنا انتشار الفسفور في الجيرمانيوم بالآلية الفجوية، آخذين بعين الاعتبار مساهمة الفجوات ثنائية الشحنة السالبة و عبرنا عن معامل انتشار الفسفور في الجيرمانيوم بالتناسب التربيعي بينه وبين تركيز الالكترونات الحرة في الجيرمانيوم. قمنا بعد ذلك بمحاكاة المنحنيات التجريبية ببرنامج بلغة الفورترن أعدد حصيصا لذلك ويعتمد على الحل العددي للمعادلة التفاضلية الجزئية لقانون فيك الثاني بطريقة الفروق المتناهية.

### 1.3- نمذجة الانتشار:

لمحاكاة المنحنيات التجريبية اعتمدنا على النموذج الذي يعتبر انتشار الفسفور في الجيرمانيوم يتم عبر الفجوات ثنائية الشحنة السالبة حيث يكتب معامل الانتشار بالعلاقة التالية [1]:

$$D = \left( \frac{n}{n_i} \right)^2 D^= \quad (1.3)$$

تمثل  $n$  تركيز الالكترونات الحرة،  $n_i$  تركيز الالكترونات الذاتية.

من خلال قانون فعل الكتلة وقانون انحفاظ الشحنة، كثافة الالكترونات الحرة تعطى بالعلاقة التالية:

$$n = \frac{1}{2} \left( c + \sqrt{c^2 + 4n_i^2} \right) \quad (9)$$

$D^=$  معامل الانتشار عبر الفجوات ثنائية الشحنة السالبة.

عندئذ نستطيع كتابة عبارة معامل الانتشار على النحو التالي:

$$D = \frac{D^=}{n_i^2} n^2 \quad (1.3)$$

$$(1.3) \quad D = \alpha n^2$$

$\alpha$  معامل التناسب التربيعي.

تدفق الفسفور يعبّر عنه كمايلي [2]:

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x} - Dc \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (6.3)$$

العلاقة الأخيرة نستطيع أن نكتبها كمايلي:

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x} - Dc \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial x} \quad (7.3)$$

$$j = -D \left( 1 + c \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial c} \right) \frac{\partial c}{\partial x} \quad (8.3)$$

عندئذ عبارة التدفق يكتب بالشكل التالي:

$$j = - \left( 1 + \frac{c}{2n_i} \left( \left( \frac{c}{2n_i} \right)^2 + 1 \right)^{-1/2} \right) D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (10.3)$$

$$j = -hD \frac{\partial c}{\partial x} \quad (11.3)$$

المقدار  $h$  يدعى بمعامل التسريع الكهربائي حيث:

$$h = 1 + \frac{c}{2n_i} \left( \left( \frac{c}{2n_i} \right)^2 + 1 \right)^{-1/2} \quad (12.3)$$

$$D^{\text{eff}} = hD \quad (13.3)$$

$$j = -D^{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial x} \quad (14.3)$$

من معادلة الاستمرار نحصل على القانون الثاني لفيك الذي يعبر عن التطور الزمني لتركيز للفرد المنتشر:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \frac{\partial j}{\partial x} \quad (17.3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D^{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (18.3)$$

### 2.3- محاكاة الانتشار

- محاكاة منحنيات الانتشار اعتمدنا على برنامج بلغة الفورترن يعتمد هذا البرنامج على الحل العددي لقانون فيك الثاني باستخدام تقريبات الفروق المتناهية.
- اخترنا قيم  $\alpha$  معامل التناسب التربيعي التي تحقق تطابق منحنيات المحاكاة مع المنحنيات التجريبية
- اخترنا قيم  $n_i$  تركيز الالكترونات الذاتية وفقا للمرجع [2].

### 3.3- نتائج ومناقشة:

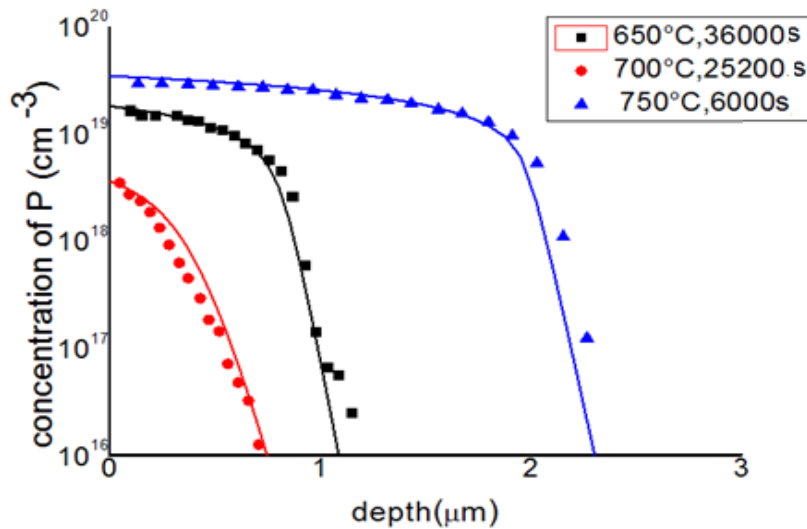
#### 1.3.3- محاكاة المنحنيات التجريبية:

الشكل (28) و(29) يوضح مقارنة بين منحنيات المحاكاة التي تحصلنا عليها وفقا لقيم معامل التناسب التربيعي

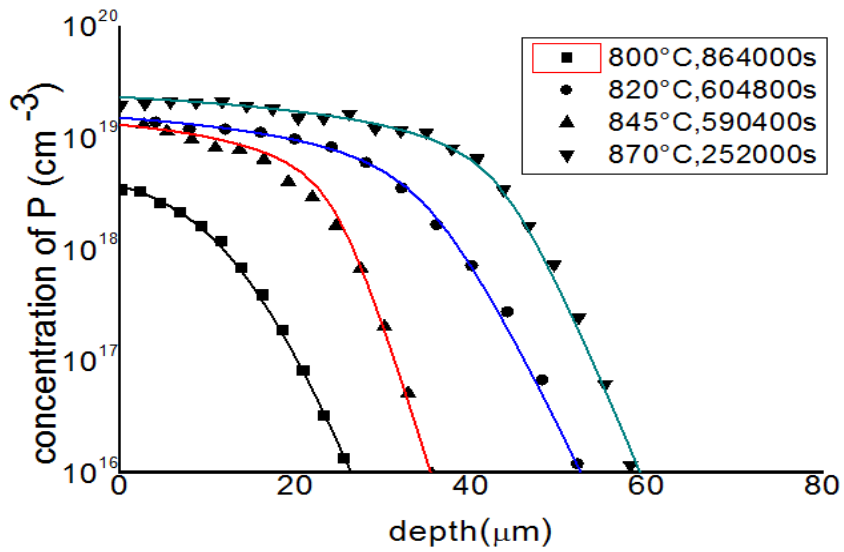
التي اخترناها عند مختلف درجات الحرارة المبينة في الجدول (7) أدناه والمنحنيات التجريبية.

الجدول (7) يبين مختلف المقادير المستخدمة في المحاكاة

$C_0$ (cm <sup>-3</sup> )	t(s)	T (°c)	$n_i$	$\alpha$ (cm <sup>8</sup> s <sup>-1</sup> )
$1.8 \times 10^{19}$	36000	650	$5.2 \times 10^{18}$	$2.31 \times 10^{-52}$
$3.6 \times 10^{18}$	25200	700	$4.1 \times 10^{18}$	$6.00 \times 10^{-52}$
$3.5 \times 10^{19}$	6000	750	$5.7 \times 10^{18}$	$2.68 \times 10^{-51}$
$3.7 \times 10^{18}$	864000	800	$5.3 \times 10^{18}$	$1.35 \times 10^{-50}$
$1.3 \times 10^{19}$	604800	820	$4.8 \times 10^{18}$	$2.17 \times 10^{-50}$
$1.5 \times 10^{19}$	590400	845	$6.3 \times 10^{18}$	$3.02 \times 10^{-50}$
$2.3 \times 10^{19}$	252000	870	$7.0 \times 10^{18}$	$5.51 \times 10^{-50}$



الشكل (28) مقارنة منحنيات المحاكاة والمنحنيات التجريبية [1] مقاسة بواسطة SIMS

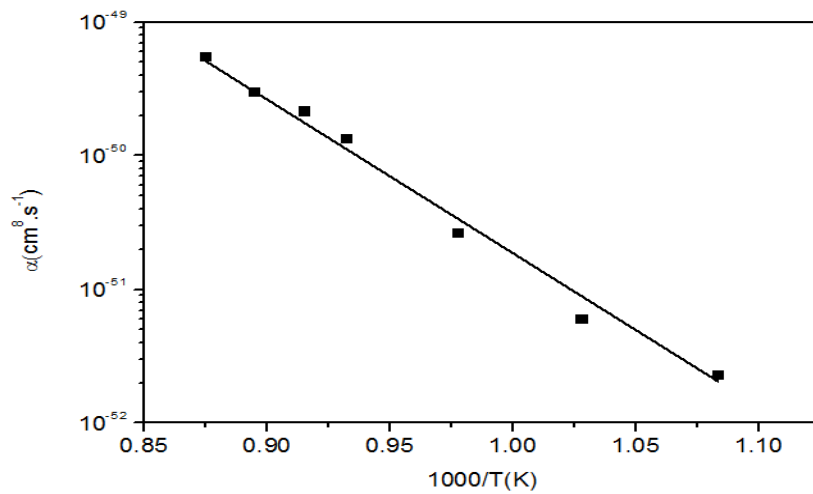


الشكل (29) مقارنة منحنيات المحاكاة والمنحنيات التجريبية [1] مقاسة بواسطة SRP

من الواضح التطابق بين منحنيات المحاكاة والمنحنيات التجريبية مما يبين أن معامل انتشار الفسفور في الجيرمانيوم يتناسب مع مربع تركيز الالكترونات الحرة في الجيرمانيوم وفقا لقيم عامل التناسب  $\alpha$  التي اخترناها.

### 2.3.3- عامل التناسب التربيعي:

الشكل (30) يوضح تغيرات معامل التناسب التربيعي مع مقلوب درجة الحرارة.



الشكل (30) تغيرات عامل التناسب التربيع مع مقلوب درجة الحرارة



يرتبط عامل التناسب التربيعي بدرجة الحرارة وفق العلاقة التالية:

$$\alpha = 572.3 \times 10^{-42} \exp\left(-\frac{2.28eV}{k_B T}\right) (\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$$

### 3.3.3- معامل الانتشار الذاتي:

لدينا:

$$D_i = \alpha n_i^2 \quad (1.3)$$

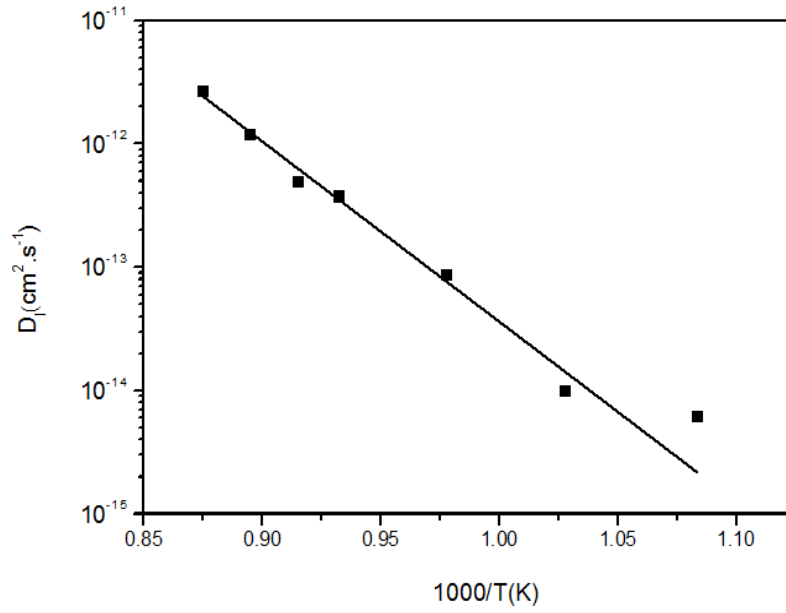
وعليه يمكننا استنتاج قيم معامل الانتشار الذاتي عند مختلف درجة الحرارة المبينة في الجدول أدناه

الشكل (31) يوضح تغيرات معامل الانتشار الذاتي للفسفور في الجيرمانيوم مع مقلوب درجة الحرارة وفقا

لمعطياتنا المستخدمة والمحاكاة.

جدول (8) قيم معامل الانتشار الذاتي المافقة لدرجات الحرارة المبينة

T (°c)	D <sub>i</sub>
650	6.25×10 <sup>-15</sup>
700	1.01×10 <sup>-14</sup>
750	8.71×10 <sup>-14</sup>
800	3.79×10 <sup>-13</sup>
820	5.00×10 <sup>-13</sup>
845	1.20×10 <sup>-12</sup>
870	2.70×10 <sup>-12</sup>



الشكل (31) تغيرات معامل الانتشار مع مقلوب درجة الحرارة

يرتبط معامل الانتشار للفسفور في الجيرمانيوم بدرجة الحرارة وفق العلاقة التالية:

$$D_i = 14.7 \exp\left(-\frac{2.9eV}{k_B T}\right) (\text{cm}^2.\text{s}^{-1})$$

حيث طاقة التنشيط  $E = 2.9eV$

### مراجع الفصل الثالث

- [1] Sergej Brotzmann and Hartmut Bracht. Intrinsic and extrinsic diffusion of phosphorus, arsenic, and antimony in germanium. J. Appl. Phys. 103, 033508 (2008).
- [2] T. Canneaux , D. Mathiot, J. P. Ponpon, Y.Leroy. Modeling of phosphorus diffusion in Ge accounting for a cubic dependence of the diffusivity with the electron concentration. Thin Solid Films 518, 2394(2010).

الخاتمة

## الخاتمة العامة

تعتبر أنصاف النواقل أساس التطور التكنولوجي الذي نشهده اليوم لما تتميز به من خصائص عن بقية المواد الأخرى مثل حاملات الشحنة، الفاصل الطاقي . حاليا هذه التكنولوجيا تقوم أساسا على عنصر السيليسيوم، لكن مواصلة التقدم بالاعتماد عليه أصبحت تواجه صعوبات مع كل جيل جديد من التكنولوجيا التي أصبحت تتوجه نحو مكونات صغيرة الحجم وذات فعالية كبيرة في معالجة المعلومات الأمر الذي يجعل التيارات السطحية الظائفة كبيرة، مما دفع الباحثين لإدخال مواد وبنى جديدة. في هذا الصدد برز الجيرمانيوم كمرشح واعد لتعويض السيليسيوم لما يتميز به من خصائص. في هذه المذكرة سلطنا الضوء على هذا النصف ناقل ودرسنا انتشار الفسفور في الجيرمانيوم، حيث نمذجنا معامل الانتشار بالأخذ بعين الاعتبار التناسب التربيعي بينه وبين مربع تركيز الالكترونات الحرة وحاكينا المنحنيات التجريبية. بينت نتائجنا مايلي:

- انتشار الفسفور في الجيرمانيوم يتم بشكل اساسي عبر فجوات الجيرمانيوم ثنائية الشحنة السالبة.
- معامل انتشار الفسفور في الجيرمانيوم يتناسب مع مربع تركيز الالكترونات الحرة في الجيرمانيوم
- طاقة تنشيط الفسفور في الجيرمانيوم هي  $E = 2.9eV$
- يرتبط معامل التناسب التربيعي ومعامل الانتشار الذاتي وفق المعادلة بدرجة الحرارة وفق المعادلات التالية :

$$\alpha = 572.3 \times 10^{-42} \exp\left(-\frac{2.28eV}{k_B T}\right) (\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad -$$

$$D_i = 14.7 \exp\left(-\frac{2.9eV}{k_B T}\right) (\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}) \quad -$$

## ملخص

برز الجيرمانيوم كبديل واعد لتعويض السيليسيوم لمواصلة التطور الحاصل في تكنولوجيا أنصاف النواقل. معرفة معالم انتشار المطعومات في هذا النصف ناقل يعتبر أمر ضرور لانجاز مكونات الكترونية عالية الأداء. في هذه المذكرة قمنا بدراسة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم وذلك بنمذجة هذا الانتشار وفق الآلية الفجوية اخذين بعين الاعتبار التناسب التربيعي بين معامل الانتشار ومربع تركيز الالكترونات الحرة ومحاكاة منحنيات انتشار تجريبية للفسفور في الجيرمانيوم. محاكاة دقيقة تحصلنا عليها أكدت هذا التناسب ومكنتنا من تحديد كيفية ارتباط كل من عامل التناسب ومعامل الانتشار الذاتي بدرجة الحرارة حيث وجدنا انا طاقة التنشيط للفسفور في الجيرمانيوم تقدر ب

$$.E = 2.9eV$$

**الكلمات المفتاحية:** الفسفور, الانتشار, الآلية الفجوية, الجيرمانيوم

## Résumé

Le germanium est apparu comme une alternative prometteuse pour remplacer le silicium afin de poursuivre le développement de la technologie des semi-conducteurs. Connaître les paramètres de diffusion de dopants dans ce semi-conducteur est nécessaire pour réaliser des composants électroniques performants. Dans cette note, nous étudions la diffusion du phosphore dans le germanium en modélisant cette diffusion selon le mécanisme lacunaire, en tenant compte de la proportionnalité au carré entre le coefficient de diffusion et le carré de la concentration en électrons libres, et en simulant des courbes expérimentales de diffusion du phosphore dans germanium. La simulation précise que nous avons obtenue a confirmé cette proportionnalité et nous a permis de déterminer comment le facteur de proportionnalité et le coefficient d'autodiffusion sont liés à la température, où nous avons trouvé que l'énergie d'activation du phosphore dans le germanium est estimée à  $E = 2.9eV$

**Mots clés :** Phosphore, diffusion, mécanisme lacunaire, Le germanium