



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة قاصدي مرباح ورقلة  
كلية الرياضيات وعلوم المادة  
قسم الفيزياء

مذكرة لنيل شهادة الماستر ل.م.د.

تخصص: فيزياء المواد

من إعداد الطالبة : بن بادة خولة

الموضوع :

دراسة بالمحاكاة لانتشار الفسفور في الجيرمانيوم

نوقشت يوم : 2019 /06/26م

أمام لجنة المناقشين المكونة من الأساتذة :

رئيسا	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ تعليم عالي	غرياني رشيد
مناقشا	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ محاضر "ب"	سوداني محمد البار
مشرفا و مقررا	المدرسة العليا للأساتذة ورقلة	أستاذ محاضر "ب"	سويقات عبد القادر

الموسم الجامعي: 2018 /2019

# الأهداء

الهي لا يطيب الليل إلا بشكرك ولا يطيب الليل إلا بطاعتك  
الهي لا تطيب اللحظات إلا بذكرك ولا تطيب الآخرة إلا بعفوك

**\* الله جل جلاله \***

إلى من بلغ الرسالة و أدى الأمانة ونصح الأمة سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم

إلى نبي الرحمة ونور العالم

**\* محمد عليه الصلاة والسلام \***

إلى **\* أبي \*** الذي لم ييخل علي بشيء

إلى بهجتي في الحياة إلى نبع الحب والحنان إلى سر وجودي

إلى من كان دعائها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي إلى أعلى الحبيب

**\* أمي الغالية \***

إلى الزهور التي ينبعث في أنفسهم التفاؤل و البهجة إخوتي الأحباء **\* نصر الدين \* صديق \* فريال \* هيثم \***

**\* حسين \* ريم \* صبرينة \***

إلى كل أساتذتي الكرام و الأفاضل ، وخاصة أستاذي المشرف الذي منحني من وقته ولم ييخل علي بكل ما

يستطيع به لمساعدتي **\* عبد القادر سويقات \*** .

إلى كل من نسيهم قلبي .. ولم ينساهم قلبي .. ومن خط اسمه على خارطة دربي ..

اهدي لكم هذا العمل .

## **\* خولة \***

# شكر وتقدير

الحمد لله الذي يسر أمرنا ووقفنا في عملنا وحقق أمانينا ، والصلاة والسلام على نبي الرحمة محمد وآله وصحبه  
أجمعين .

يسرني بعد انتهائي من هذا العمل المتواضع ، أن نتقدم بجزيل شكري وعظيم امتناني إلى أستاذي الفاضل **د/عبد  
القادر سويقات** ، لتفضله بالإشراف على هذا البحث ، وعلى سعه صدره وسمو أخلاقه وعلمه ومعرفته الواسعة  
بمجال هذا البحث ، فله الأثر الأكبر في مساعدتي وإرشادي وتوجيهي ، ومني له خالص التقدير و الدعاء  
جعل الله له ذلك في موازين حسناته إن شاء الله.

كما لا يفوتنا أن نقدم خالص شكرنا لرئيس القسم و لحضرات الأساتذة أعضاء لجنة التحكيم والمناقشة لقبولهم  
مناقشة هذه المذكرة و إفادتي بتصحيحاتهم واثرائي بتوجيهاتهم القيمة .  
كما لا أنسى شكر كل من قدم لي يد العون والمساعدة ، كل من دعمني ودعا لي .

# الفهرس

الصفحة	العنوان
I	الإهداء.....
II	الشكر والتقدير .....
III	الفهرس.....
VI	قائمة الجداول.....
VII	قائمة الأشكال .....
IX	قائمة الرموز.....
1	المقدمة.....
<b>الفصل الأول</b>	
3	تمهيد.....
3	1.1 العوازل ، أنصاف النواقل و النواقل .....
4	أنواع أنصاف النواقل .....
4	1.2.1 أنصاف النواقل الأصلية ( الذاتية ) ..... Intrinsic semiconductors .....
6	2.1 أنصاف النواقل المطعمة ( اللاذاتية ) ..... Extrinsic semiconductors ..
6	2.2.1 نصف الناقل من النوع n .....
8	2.2.2.1 نصف الناقل من النوع p.....
9	3.1 خلاصة .....
10	مراجع الفصل الأول .....
<b>الفصل الثاني</b>	
11	تمهيد .....

11	..... اكتشاف الجيرمانيوم	2.1
12	..... تواجد الجيرمانيوم في الطبيعة	2.2
12	..... تنقية الجيرمانيوم	3.2
13	..... طريقة Czochralski	
13	..... طريقة الصهر النطاقي Float zone	2.3.2
14	..... العيوب النقطية للجيرمانيوم	4.2
15	..... الحالات الشحنية لفجوات الجيرمانيوم	1.4.2
17	..... خواص الجيرمانيوم	5.2
17	..... النية البلورية	
18	..... الفاصل الطاقي	2.5.2
19	..... تركيز حاملات الشحنة الذاتية	3.5.2
22	..... خلاصة	6.2
23	مراجع الفصل الثاني	
<b>الفصل الثالث</b>		
27	..... تمهيد	
27	..... طرق التطعيم	1.3
27	..... الغرس الأيوني Ion implantation	
28	..... الأنتشار الحراري	2.1.3
29	..... منابع الشوائب المطعمة	2.3
29	..... آلية الانتشار المجهرية للفسفور في الجيرمانيوم	3.3
30	..... معامل الانتشار الذاتي	4.3
30	..... الدراسة النظرية لمعامل الانتشار	
33	..... معامل انتشار الفوسفور في الجيرمانيوم	5.3
34	..... خلاصة	6.5

35	مراجع الفصل الثالث .....
<b>الفصل الرابع</b>	
36	تمهيد .....
36	1.4 معامل الانتشار الفعال .....
38	2.4 القانون الثاني ل فيك .....
39	3.4 محاكاة منحنيات الانتشار .....
42	4.4 نتائج ومناقشة .....
42	1.4.4 محاكاة منحنيات التجريبية ومقارنتها .....
43	دراسة العوامل المؤثرة على انتشار الفسفور في الجيرمانيوم.....
43	1.2.4.4 تأثير التطعيم المسبق .....
44	2.2.4.4 تأثير درجة الحرارة .....
45	3.2.4.4 تأثير التركيز على السطح .....
45	4.2.4.4 تأثير الزمن .....
46	5.4 خلاصة.....
47	مراجع الفصل الرابع .....
48	الخاتمه .....

# فهرس الجداول

الصفحة	محتوى الجداول	الرقم
<b>الفصل الثاني</b>		
21	يوضح بعض خواص الجيرمانيوم.....	1
<b>الفصل الثالث</b>		
29	يوضح منابع المطعومات.....	2
34	قيم الحد الأنطروي ل p وطاقة التنشيط في الجيرمانيوم.....	3
<b>الفصل الرابع</b>		
42	قيم التركيز الابتدائي على السطح، معامل الانتشار الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم المستعملة في المحاكاة.....	4
44	يبين المقادير المستعملة في هذه المحاكاة.....	5
45	قيمة التركيز الابتدائي على السطح ، قيمة تركيز الغاليوم في الجرمانيوم ، درجات الحرارة وزمن انتشار الفسفور في الجيرمانيوم المطعم بالغاليوم.....	6
45	قيم التراكيز على السطح ، قيمة تركيز الغاليوم في الجيرمانيوم ، درجة الحرارة وزمن انتشار الفسفور في الجرمانيوم المطعم بالغاليوم.....	7
46	قيمة التركيز الابتدائي على السطح ، قيمة تركيز الغاليوم في الجرمانيوم ، درجة حرارة و أزمنة انتشار الفسفور في الجرمانيوم المطعم بالغاليوم.....	8

# قائمة الأشكال

الصفحة	محتوى الشكل	الرقم
<b>الفصل الأول</b>		
4	يوضح الفجوة الطاقية الممنوعة $E_g$ .....	1
5	يوضح شبكة الجيرمانيوم النقي .....	2
7	يوضح التطعيم من النوع السالب وتحرر الكترولون .....	3
8	يوضح مستوى المانحات المشغول بالالكترولونات وانتقالها إلى عصابة النقل بعد اثارها .....	4
8	يوضح التطعيم من النوع الموجب وتخلف ثقب .....	5
9	يوضح مستويات الطاقة للآخذات داخل العصابة الممنوعة .....	6
<b>الفصل الثاني</b>		
11	أول ترانزيستر تم اختراعه .....	7
12	سبيكة الجيرمانيوم .....	8
13	طريقة Czochralski .....	9
14	طريقة الصهر النطاقي .....	10
15	البنية البلورية للجيرمانيوم .....	11
15	يوضح تواجد فراغ في البنية البلورية .....	12
16	مستويات فجوات الجيرمانيوم المشحونة .....	13
17	يبين حالات المراكز E في العصابة الممنوعة للجيرمانيوم مأخوذ من المرجع [16] .....	14
18	البنية البلورية للجيرمانيوم .....	15
18	مخطط عصابات الطاقة للجيرمانيوم .....	16

19	تغيرات الفاصل الطاقي للجيرمانيوم والسيليسيوم بدلالة درجة الحرارة.....	17
21	يوضح منحنى تغيرات كثافة حاملات الشحنة للجيرمانيوم بدلالة درجة الحرارة.....	18
<b>الفصل الثالث</b>		
28	رسم توضيحي لجهاز الغرس الايوني.....	19
30	مخطط يبرز الآلية الفجوية .....	20
31	الحاجز الكموني أثناء الانتقال من موضع إلى آخر.....	21
33	يمثل تغيرات معامل انتشار P في الجيرمانيوم حسب المراجع المذكورة.....	22
<b>الفصل الرابع</b>		
40	يوضح تجزئة البعد وزمن الانتشار.....	23
42	المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة ( الخطوط المستمرة ) والمنحنيات التجريبية (المرجع ) لانتشار الفسفور في الجيرمانيوم.....	24
43	تغيرات معامل الانتشار الذاتي مع مقلوب درجة الحرارة.....	25
44	يبين تأثير التطعيم المسبق بالغاليوم على انتشار الفسفور في الجيرمانيوم.....	26
44	تأثير درجة الحرارة على انتشار الفسفور في الجيرمانيوم .....	27
45	تأثير التركيز على السطح على الانتشار.....	28
46	تأثير الزمن على الانتشار .....	29

# قائمة الرموز

الرمز	مدلوله	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	$cm^{-3}$
$N_c$	الكثافة الفعالة للالكترونات في عصابة النقل	$cm^{-3}$
$N_v$	الكثافة الفعالة للثقوب في عصابة التكافؤ	$cm^{-3}$
$n$	تركيز الالكترونات الحرة	$cm^{-3}$
$p$	تركيز الثقوب	$cm^{-3}$
$m_e^*$	كتلة الفعالة للثقوب	kg
$m_h^*$	كتلة الفعالة للالكترونات	kg
$T$	درجة الحرارة	K
$K_B$	ثابت بولتزمان	$eV.K^{-1}$
$D$	معامل الانتشار	$cm^2.s^{-1}$
$C$	تركيز الشائبة المطعمة	$atom.cm^{-3}$

## المقدمة

ان معظم الأجهزة الالكترونية الحديثة تعتمد في عملها على مواد لها خصائص فيزيائية وكيميائية مميزة، والمتمثلة في المواد النصف الناقلة. لقد بدأت بحوث مكثفة وموسعة للتعرف على الخواص البنيوية، الضوئية و الكهربائية لهذه المواد و إمكانية الاستفادة منها عمليا، وقد أثمرت هذه البحوث عن تصنيع المقاومات،الديود، الترانزيستور، الخلايا الشمسية و الدارات الالكترونية المتكاملة. يعتبر السيليكون العمود الفقري لصناعة هذه المركبات الالكترونية، ويرجع ذلك لخصائص يتميز بها عن غيره من أنصاف النواقل، فأكسيده  $Si_2O_4$  عازل مقبول لهذه المركبات ويعد السطح البيني له ذا نوعية، مما يبسط صناعتها وبالتالي إنقاص تكلفتها. لكن مواصلة مواكبة لسيرورة التقدم التكنولوجي في مجالي الاتصال والإعلام أصبحت تواجه صعوبات متزايدة مع كل جيل من التكنولوجيا، فأني تحجيم هذه المركبات السيليكونية يجعل التيارات الضائعة من السطح البيني جد معتبرة، ولتجاوز هذا الإشكال و مواصلة سيرورة التقدم والتطور لهذه المكونات بزيادة تحجيمها أصبح من الضروري تعويض  $Si_2O_4$  بمواد تمتلك ثابت عزل أكبر وهو ما يفقد السيليكون أهميته مقارنة بأنصاف النواقل الأخرى التي تمتلك خصائص ممتازة مثل حركية حاملات الشحنة المرتفعة. قصر الفاصل الطاقوي.

في هذا السياق اتجاهات عديدة عمدت إلى إدخال مواد و بني جديدة تكون بديلة للسليسيوم قصد مواكبة هذا التطور. حركية حاملات الشحنة المرتفعة وقصر الفاصل الطاقوي لدى الجيرمانيوم، جددت الاهتمام بهذا النصف الناقل باعتباره مرشحا واعدة لتعويض السليسيوم من أجل مواصلة تطوير هذه المكونات. هذا الاهتمام بالجيرمانيوم حفز على دراسة انتشار المطعمات بنوعيتها السالب و الموجب في هذا النصف الناقل باعتبارها مفتاحا لتحقيق دارات نانومترية مطورة وجد فعالة.

في هذا الإطار اهتمنا بدراسة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم حيث قمنا بنمذجة هذا الانتشار بالآلية الفجوية، ومحاكاة منحنيات الانتشار التجريبية للفسفور في الجيرمانيوم و استنتاج معامل الانتشار الذاتي. قمنا بعد ذلك بدراسة مختلف العوامل المؤثرة في انتشار الفسفور في الجيرمانيوم ، التي يعتبر التحكم فيها مفتاحا لتحقيق مركبات الكترونية دقيقة. أتمنا ذلك وفق خطة بحث تضمنت مقدمة وأربعة فصول و خاتمة للدراسة

- **الفصل الأول :** تطرقنا فيه إلى العوازل، النواقل وأنصاف النواقل الأصلية والمطعمة بنوعيهما النوع  $n$  و النوع  $p$ .

- **الفصل الثاني :** تطرقنا فيه إلى الجيرمانيوم ومميزاته وتواجده في الطبيعة و اكتشافه، كما تضمن تنقية الجيرمانيوم، العيوب النقطية به وخواصه (البنية البلورية، الفاصل الطاقوي، تركيز حاملات الشحنة الذاتية)

- **الفصل الثالث :** يتضمن التطعيم وأهم طرقه المتمثلة في الغرس الأيوني والانتشار، كما تطرقنا فيه إلى منابع المطعمات وكذلك إلى آلية انتشار الفسفور في الجيرمانيوم، تضمن هذا الفصل كذلك دراسة نظرية لمعامل الانتشار و دراسات حول معامل انتشار الفوسفور في الجيرمانيوم.

- **الفصل الرابع :** قمنا فيه بنمذجة ومحاكاة منحنيات انتشار الفوسفور في الجيرمانيوم واستنتاج معامل الانتشار الذاتي للفوسفور في الجيرمانيوم و دراسة مختلف العوامل المؤثرة في انتشار الفسفور في الجيرمانيوم.

- **الخاتمة :** حوصلنا فيها نتائج دراستنا في هذه المذكرة .

الفصل الأول :

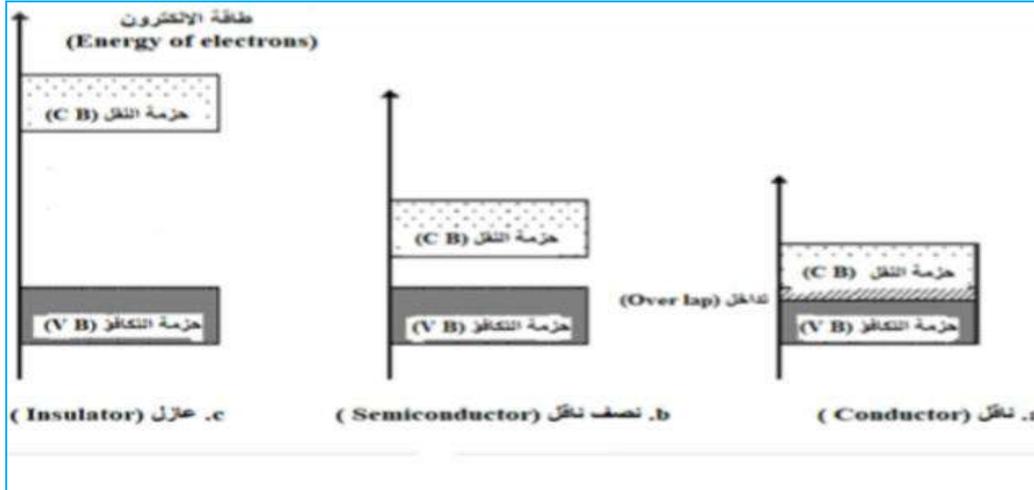
أنصاف النواقل ومميزاتها

## تمهيد :

يمكن تصنيف المواد الصلبة المتواجدة في الطبيعة انطلاقاً من قابليتها للنقل الكهربائي إلى ثلاث مجموعات والتي تتمثل في : مواد ناقلة ( conductor materials ) ، مواد عازلة ( Insulators materials ) و مواد نصف ناقلة ( semiconductor materials ). وعليه سنتطرق في هذا الفصل إلى هذه الطوائف الثلاثة مع ذكر أهم أنواع و مميزات أنصاف النواقل .

## 1.1 العوازل , المعادن و أنصاف النواقل :

بالاعتماد على أساس تركيب الحزم للمادة وكذا على مقدار فجوة الطاقة الممنوعة ( $E_g$ ) و التي تفصل بين حزمة النقل (Bc) وحزمة التكافؤ ( $B_v$ ) و بالإضافة إلى الخواص الالكتروفيزائية تم تصنيف هذه المواد. في المواد العازلة وعند درجة  $0\text{ K}$  تكون عصابة النقل فارغة تماماً من الالكترونات بينما عصابة التكافؤ تكون ممتلئة، وحتى عند رفع درجة حرارتها تبقى هذه الخاصية في العوازل ، وذلك لأن الطاقة الحرارية  $KT$  غير كافية لنقل إلكترون من عصابة التكافؤ إلى عصابة النقل وجعله حراً ، وهذا راجع إلى كبر الفاصل الطاقوي  $E_g$  حيث تقدر قيمة هذه الطاقة ب  $9\text{ eV}$  [3-1] ، فناقلية العوازل ضعيفة جداً تتراوح فيما بينها في مجال  $(10^{-18}\Omega.\text{cm}^{-1} - 10^{-8}\Omega.\text{cm}^{-1})$  [4]. أما النواقل فتتميز بتراكب عصابة النقل وعصابة التكافؤ فوق بعضها البعض ، لذا فليس هناك فاصل طاقي  $E_g$  وعصابة النقل تكون مشغولة جزئياً حتى عند درجات الحرارة المنخفضة ، مما يؤدي إلى ناقلية كهربائية عالية جداً تتراوح بين  $(10^4\Omega.\text{cm}^{-1} - 10^6\Omega.\text{cm}^{-1})$  [2]. أما في ما يخص أنصاف النواقل فلها ناقلية تقع بين هاتين المجموعتين أي بحدود  $(10^4\Omega.\text{cm}^{-1} - 10^8\Omega.\text{cm}^{-1})$  [4]، بالإضافة إلى أن الفاصل الطاقوي  $E_g$  لديها صغير بالمقارنة مع العوازل ( $1\text{ eV}$ ) حيث يمكن للإثارة الحرارية أو الضوئية أن تجعل الالكترونات تنتقل من عصابة النقل Bc إلى عصابة التكافؤ  $B_v$  [5] .



الشكل (1) : يوضح الفجوة الطاقية الممنوعة  $E_g$

## 2.1 أنواع أنصاف النواقل :

### 1.2.1 أنصاف النواقل الأصلية ( الذاتية ) : Intrinsic semiconductors

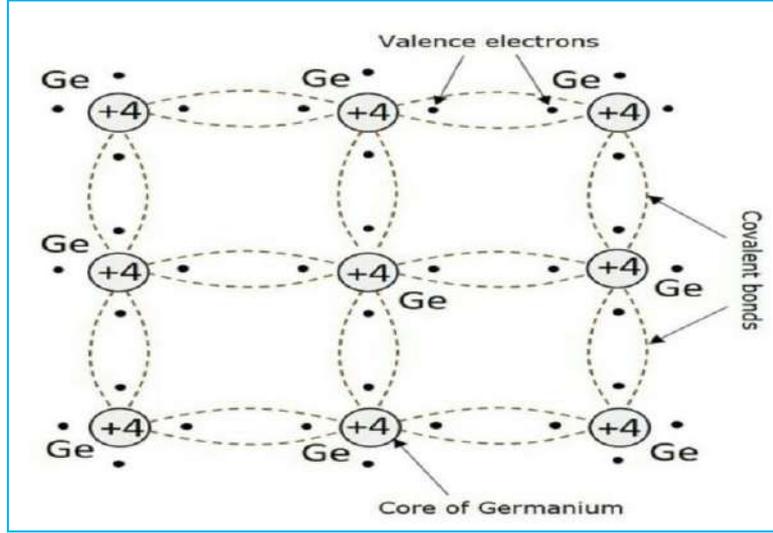
تنتمي لعناصر المجموعة الرابعة ( IV ) من الجدول الدوري أهمها السليكون و الجرمانيوم وتعرف على أنها أنصاف نواقل نقية خالية من الشوائب والعيوب البلورية. في نصف الناقل النقي الثقوب الموجودة في عصابة التكافؤ هي الشواغر الناجمة عن الالكترونات التي أثيرت حراريا إلى عصابة النقل [2]، وهكذا فان كل ثقب موجود في عصابة التكافؤ يقابله إلكترون موجود في عصابة النقل، وعند التوازن الحراري يكون عدد الكترونات النقل مساوي بالضبط عدد ثقوب التكافؤ أي [7]:

$$p=n=n_i \quad (1.1)$$

حيث  $p$  تمثل الكثافة الكلية للثقوب في عصابة التكافؤ و  $n$  تمثل الكثافة الكلية للالكترونات في عصابة النقل و  $n_i$  كثافة حاملات الشحنة الذاتية في نصف الناقل النقي .

و يجدر الإشارة هنا أنه وعند درجة حرارة الصفر المطلق  $0k$  تكون حزمة التكافؤ ممتلئة كليا بالالكترونات بينما

حزمة النقل تكون فارغة كلياً منها، وعليه تعد المواد النصف الناقلة عازلة عند هذه الدرجة [2].



الشكل (2) : يوضح شبكة الجرمانيوم النقي.

ان طاقة مستوى فيرمي في نصف الناقل الذاتي عند الاتزان الحراري هي [7]:

(2.1)

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} + \frac{3}{4} K_B T \ln \left( \frac{m_h^*}{m_e^*} \right)$$

ونفرض أن كتلة الإلكترون  $m_e^*$  تساوي كتلة الثقب  $m_h^*$  (كنوع من التقريب) نحصل على [7]:

$$E_F = \frac{E_c + E_v}{2} \quad (3.1)$$

أين  $E_F$  تمثل طاقة مستوى فيرمي الذي هو عبارة عن أعلى مستوى طاقة يشغلها الإلكترون عند درجة حرارة

الصفير المطلق ، أي عدم وجود إلكترون فوق مستوى فيرمي ، لكن ارتفاع درجة الحرارة تساعد الإلكترون على

تجاوز خط فيرمي وكلما زادت درجة الحرارة زادت عدد الإلكترونات المتخطية لخط مستوى فيرمي ، و  $E_c$  تمثل

طاقة مستوى النقل و  $E_v$  تمثل طاقة مستوى التكافؤ .

### 2.2.1 أنصاف النواقل المطعمة ( اللاذاتية ) : Extrinsic semiconductors

بالإضافة إلى حاملات الشحنة التي تنشأ حرارياً في النصف الناقل يمكن خلق حاملات الشحنة ( الالكترونات والثقوب ) ، وذلك بإضافة شوائب إلى المادة النصف الناقلة النقية وبنسب قليلة ومحدودة ومناسبة، تدعى هذه العملية "التطعيم" Doping وهي التقنية الأكثر انتشاراً لتغيير الناقلية النوعية لأنصاف النواقل ، ومن أجل الحصول على خواص ضوئية مميزة أيضاً [2-5]. هذه العملية تكسب الناقل النصف النقي خواص فيزيائية تختلف عما هي عليه في حالته النقية. ينتج عن عملية التطعيم إزاحة التوازن الموجود بين تركيزي حاملات الشحنة الموجبة والسالبة بعد أن كان تركيزهما مساوي في الحالة النقية ، تجعل هذه الإزاحة تركيز الالكترونات في عصابة النقل Bc أكبر من تركيز الثقوب في عصابة التكافؤ Bv أو تركيز الالكترونات في عصابة النقل Bc أقل من تركيز الثقوب في عصابة التكافؤ Bv وذلك حسب نوع التطعيم [3].

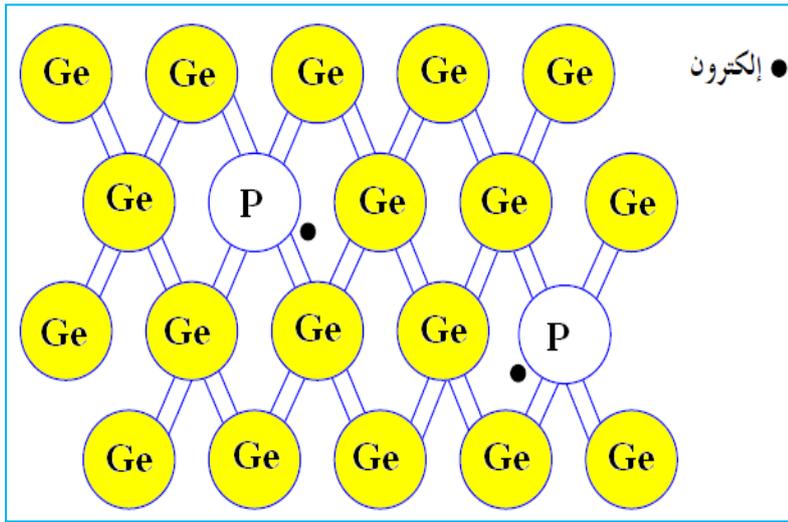
ينتج عن عملية التطعيم نوعين من أنصاف النواقل المطعمة : نصف ناقل من نوع n و نصف ناقل من النوع p حيث :

#### 1.2.2.1 نصف ناقل من النوع n :

يكون التطعيم من عناصر المجموعة الخامسة وتسمى بالممانحة ( Donors ) والتي تزيد من عدد الالكترونات التي تمثل حاملات الشحنة الأغلبية ( Majority carries ) ، بينما الثقوب تمثل حاملات الشحنة الأقلية ( Minority carries ) [6].

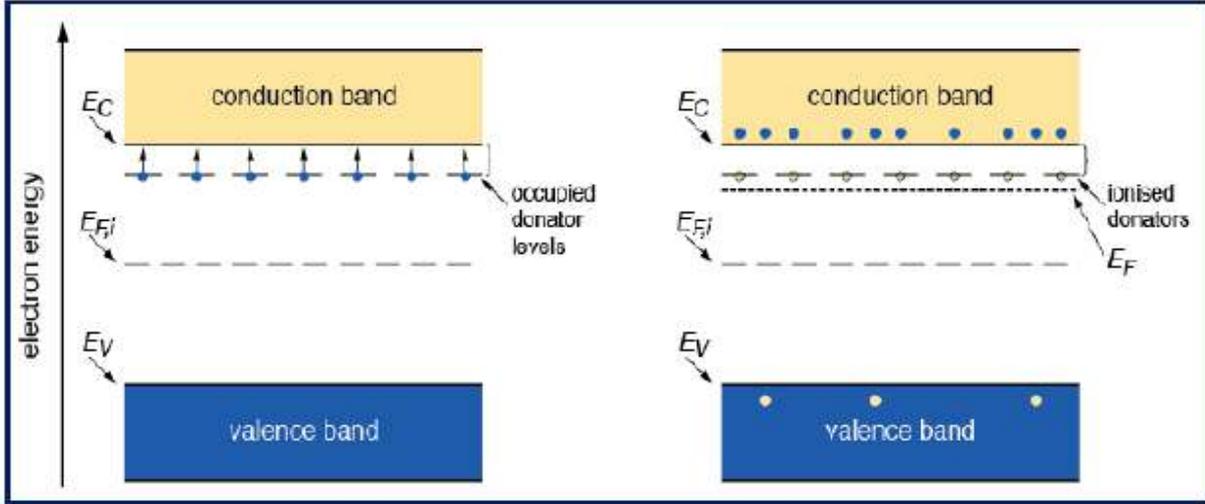
ليكن النصف الناقل من مادة الجرمانيوم والذي يحتوي على أربع الالكترونات التكافؤ لكل ذرة من ذراته في الحالة الصلبة مرتبطة مع البلور ضمن روابط تكافئية ، تحتاج هذه الالكترونات إلى طاقة تعادل الفاصل الطاقي Eg في الظروف الاعتيادية لكي تساهم في التوصيل لا تكفي درجة حرارة المحيط لتوفير هذه الطاقة . عند إضافة شائبة

خماسية التكافؤ والتي تسمى بالمانحة مثل الفسفور P والأرسنيك As إلى الشبكة البلورية للجرمانيوم [5]، تكون روابط تساهمية مع الذرات الأربع المحيطة بكل منها ويبقى إلكترون واحد معلق بالذرة الأم ، حيث تساهم المانحة بأربع الكترونات و الجرمانيوم بأربع الكترونات ،ويصبح الغلاف مشبعا ويحتوي على ثمانية الكترونات ويظل الإلكترون الخامس حر ولا يترك خلفه ثقباً عندما يتحرك وعليه يمكن بذلك نقل التيار الكهربائي [6].



الشكل (3) : يوضح التطعيم من النوع السالب وتحرر إلكترون .

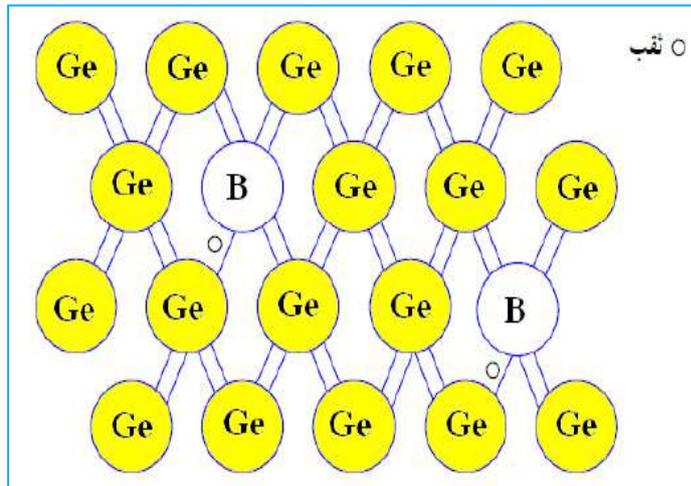
في هذه الحالة تكون مستويات الشائبة والتي تدعى بالمستويات المناحة قريبة من حزمة النقل. فبإضافة شوائب مانحة في النصف الناقل ينتج عنه حالات مشغولة بالإلكترونات داخل العصابة الممنوعة، حيث تنتقل لعصابة النقل لمجرد إثارتها بطاقة تعادل طاقة التآين كما يبينه الشكل (4) .



الشكل (4) : يوضح مستوى المانحات المشغول بالالكترونات وانتقالها لعصابة النقل بعد إثارتها.

### 2.2.2.1 نصف الناقل من النوع p :

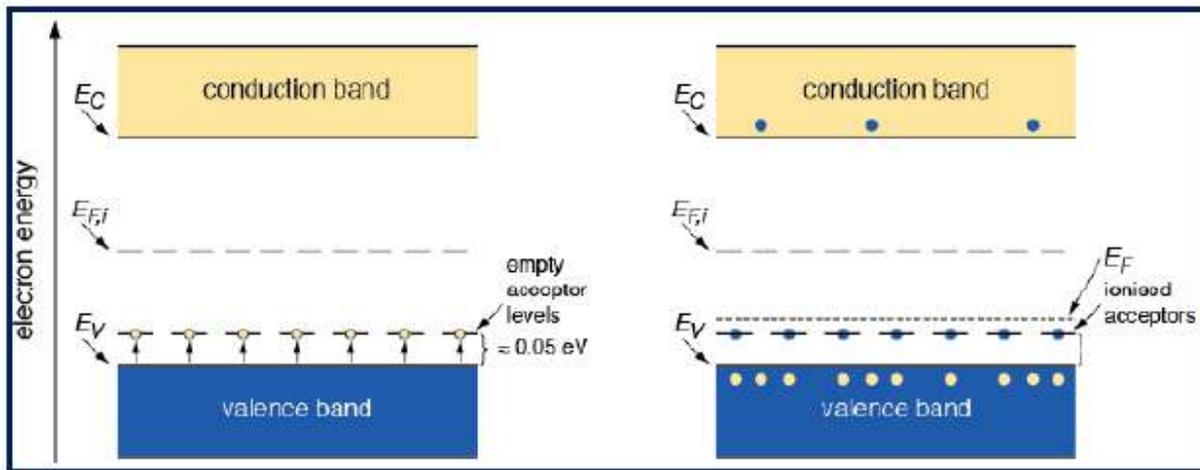
بنفس الآلية نقوم بعملية تطعيم الجرمانيوم النقي ولكن بشوائب ثلاثية التكافؤ من عناصر العمود الثالث ( III ) والتي تسمى بالشوائب الآخذة ( Acceptors ) مثل البور B و الألمنيوم Al و الغاليوم Ga ، حيث عند اشابة الجرمانيوم بإحدى هذه الشوائب فان الكترونات التكافؤ الثلاثة فيها تساهم بالرابطة التكافئية فتبقى رابطة واحدة غير مكتملة عندها تثار الالكترونات في عصابة التكافؤ لتماماً رابطة مخلفة ورائها ثقب في عصابة التكافؤ [2-5] .



الشكل (5) : يوضح التطعيم من النوع الموجب ويخلف ثقب .

ان عملية التطعيم بالشوائب الآخذة يمكن أن تخلق نصف ناقل كثافة الثقوب في عصابة التكافؤ فيه أكثر بكثير من كثافة الإلكترونات في عصابة النقل، هذا يعني أن الثقوب فيه تمثل حاملات الشحنة الأكثرية بينما الإلكترونات تشكل الحاملات الأقلية، وعلية يسمى النصف الناقل المطعم بهذه الطريقة نصف ناقل من النوع P [2].

في هذه الحالة يكون مستوى طاقة الشائبة B الموجود في الفاصل الطاقوي قريب جدا من قمة عصابة التكافؤ ، حيث تنتقل له الإلكترونات عند إثارتها بطاقة تعادل طاقة التآين من عصابة التكافؤ مخلفة ثقوبا في هذه العصابة كما يوضحه الشكل (6) .



الشكل (6) : يوضح مستويات الطاقة للآخذات داخل العصابة الممنوعة .

### 3.1 خلاصة:

تحظى المواد النصف الناقلة في الوقت الراهن بأهمية بالغة وذلك لكونها تدخل في تصنيع معظم الأجهزة الالكترونية الحديثة ، و اكتشافها يعتبر من أهم العوامل التي ساهمت بقسط كبير في ترقية التكنولوجيا الحديثة ، فالمستقبل ينذر بالاستعانة بهذه المواد أكثر فأكثر . في هذا الفصل تعرضنا إلى أنصاف النواقل وما تتميز به عن العوازل والمعادن.

## المراجع

- [1] ف.ك.تقلا، "مقدمة في فيزياء أشباه الموصلات"، ديوان المطبوعات الجامعية ، الأردن ، ص.8-14 ، (1992).
- [2] م.قعقع ، " الالكترونيات الأساسية " ، جامعة دمشق ، ص.299-308 ، 2015 .
- [3] Charles Kittel , " Physique de l'état solide " ,édition ,page ( 220-235 , 537-555) (2003) BORDAS , Paris (1983).
- [4] S.S. AL-RAWI, S.J.SHAKIR and Y.N.HUSAN " Solid state physics ",publishing , of Mousal University Arabic Version ,Mousal, (1990).
- [5] عبد القادر سويقات. أطروحة دكتوراه ، " دراسة لنصف الناقل الجيرمانيوم المطعم للاستعمال في المكونات الالكترونية الضوئية" ، الجزائر – ورقلة ، 2016.
- [6] د.عبد القادر مصباح الأمين ، " تحليل الدوائر الكهربية و الالكترونية " ، ليبيا ، 2004 .
- [7] أ.د.يسري مصطفى ، د.الحسيني الطاهر ، "مقدمة في أشباه الموصلات" ، جامعة المنصورة، ص.89، 1438 هـ - 2017 م.

الفصل الثاني :

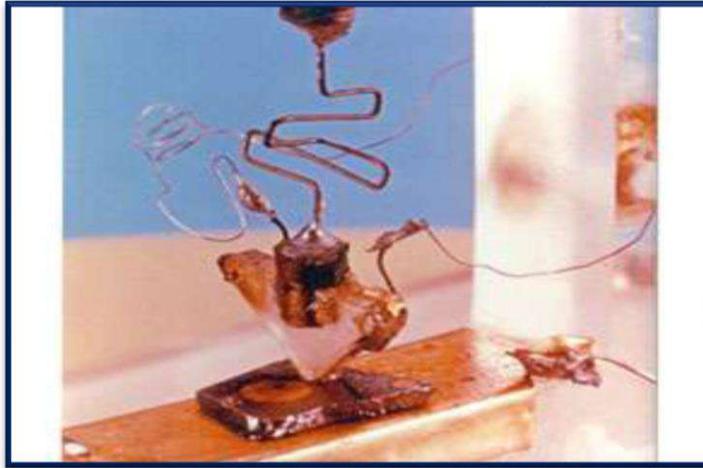
الجرمانيوم و مميزاته

## تمهيد:

تعرفنا في الفصل السابق على أنصاف النواقل و ما تتميز به. في هذا الفصل سنسلط الضوء بصفة خاصة على الجيرمانيوم، حيث سنتطرق إلى تواجده في الطبيعة واكتشافه وطرق تنقيته و العيوب النقطية المتواجدة به، كما سنتناول أيضا خواصه المتمثلة في البنية البلورية، الفاصل الطاقوي و تركيز حاملات الشحنة الذاتية.

## 1.2 اكتشاف الجيرمانيوم :

على الرغم من تنبأ العالم الروسي الكيميائي أومريتي مندليف " Dmitri Mendeleev " له إلا أن الجيرمانيوم أكتشف سنة 1886، من طرف العالم الكيميائي الألماني كليمنس وينكلر " Clemens Winkler " عند قيامه بتحليل الكيميائي للخام الأرجوديت. مندليف توقع أن يشار إليه باسم ايكاسيليكون "Eksilikon" إلا أن العالم وينكلر قرر أن يسميه جرمانيوم نسبة إلى بلده الأم ألمانيا، وهو أيضا المكان الذي أكتشفه فيه [1-3]. مع بداية الحرب العالمية الثانية طورت الصمامات ثنائية من الجيرمانيوم بهدف استخدامها في الرادارات، وفي سنة 1947 تم اختراع أول ترانزيستر و عدسات الأشعة تحت الحمراء سنة 1949 [4].



الشكل (7): أول ترانزيستر تم اختراعه.

## 2.2 تواجد الجرمانيوم في الطبيعة :

يعتبر الجرمانيوم عنصر شبه معدني رمادي اللون يقع في العمود الرابع من الجدول الدوري لمندليف أسفل السيلسيوم ( Si ) ، وهو من العناصر النادرة في الطبيعة ( %  $10^{-3}$  من وزن القشرة الأرضية ) فهو لا يتواجد نقيا وإنما ممزوجا في عناصر أخرى بشكل خامات ، حيث أن أهم خاماته هي الأرجروديت ( Argyrodite )  $Ag_8GeS_6$  ومنها استخراجها وينكلر و الكانفيلديت ( Canfieldite )  $( Ag_8 Sn Ge ) S_6$  و الجرمانيت ( Germanite )  $Cu_5 ( Cu , Fe ) As_6 Ge S_{12}$  وهو أهمها [4,5].

ان العدد الذري للجرمانيوم يقدر ب 32 و وزنه الذري يقدر ب 72.6 g/mol وله خمس نظائر طبيعية والمتمثلة في :  $Ge^{70}$ ،  $Ge^{72}$ ،  $Ge^{73}$ ،  $Ge^{74}$  و  $Ge^{76}$  و نسبة وفرتم تقدر ب : 20.84 % ، 27.54 % ، 7.73 % ، 36.28 % و 7.61 % على الترتيب ( روزمان و تايلر 1998 ) [6].



الشكل (8): سبيكة الجرمانيوم.

## 3.2 تنقية الجرمانيوم :

يمكن الاعتماد على طريقة ( Czochralski ) ( Cz ) أو طريقة الصهر النطاقي Float zone ( Fz ) ،

وذلك لتنقية الجيرمانيوم والحصول على سبائك أحادية البلورة ذات درجة عالية من النقاء .

### 1.3.2 طريقة Czochralski :

اخترع Czochralski هذه الطريقة البسيطة لنمو البلورة خلال تجربة قياس سرعة تبلور المعادن ، وفي سنة

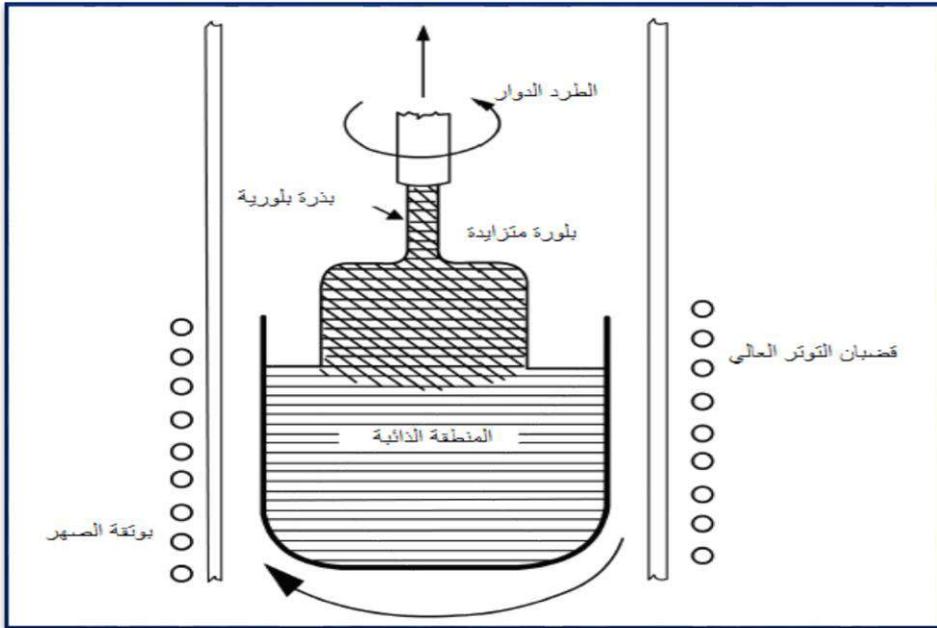
1916 أثبتت أنها مفيدة جدا تبلور العديد من السبائك [7] .

وسنوضح هذه الطريقة أكثر خلال تنقية الجيرمانيوم، حيث عند صهره في بوتقة داخل فرن يتم سحبه انطلاقا من

الوسط ببطء أحادي البلورة ، وذلك بالتزامن مع إبقاء البلورة في حالة دوران من أجل تحقيق تجانس الحمام و

مراقبة السطح البيئي الصلب - السائل [4] . ان التقليل من درجة حرارة المنصهر تجعل قطر البلورة يزداد والعكس

بالعكس [8].



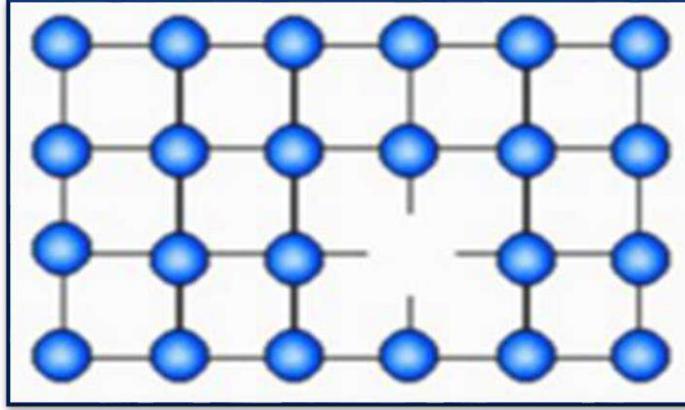
الشكل (9) : طريقة Czochralski .

### 2.3.2 طريقة الصهر النطاقي Float zone :

تقنية Fz مناسبة لإنتاج رقائق صغيرة مع شوائب منخفضة من الأوكسجين، تعتمد هذه الطريقة على الإذابة

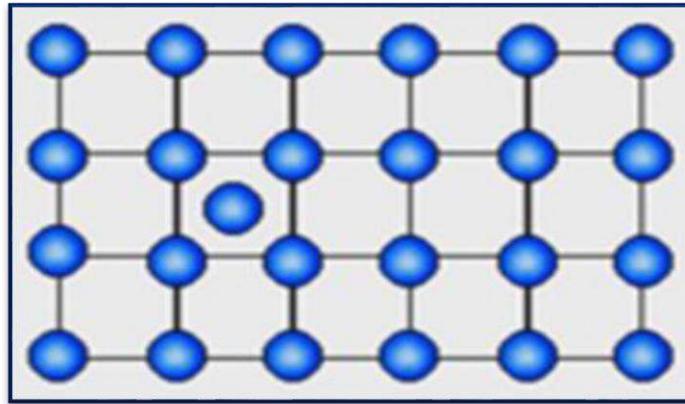
المحلية لسبيكة متعددة البلورات مع بذرة واحدة ذات اتجاه محدد، توضع في فرن من الغاز الحامل وذلك بإنزالها





الشكل (11) : يوضح تواجد فراغ في البنية البلورية .

أما الثاني فيتمثل في العيب البيني الذاتي Self-interstitial ، وهو عبارة عن ذرة مقتحمة أو بينية أو انخلالية داخل النظام البلوري للجيرمانيوم .



الشكل (12): يوضح تواجد العيب البيني الذاتي.

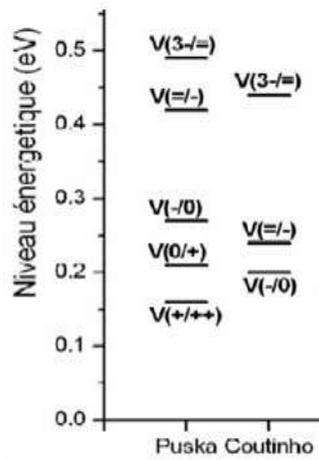
ينتشر الفسفور في الجيرمانيوم وفق الآلية الفجوية فقط [11].

#### 1.4.2 الحالات الشحنية لفجوات الجيرمانيوم :

دلت الدراسة النظرية لـ Puska في سنة 1989 أن فجوات الجيرمانيوم يمكنها أن تكون على ستة حالات شحنية تتغير بين الشحنة الثنائية الموجبة و الشحنة الثلاثية السالبة، حدود مستوياتها الطاقوية داخل العصابة الممنوعة للجيرمانيوم بالنسبة لمستوى التكافؤ هي كالتالي  $E_V + 0.16eV$  بالنسبة لـ  $V(+/+)$  ،  $E_V + 0.21eV$  بالنسبة

الدراسة الثانية كانت من طرف Coutinho في سنة 2005 حيث خلصت إلى وجود أربع حالات شحنية لفجوات الجيرمانيوم ، بداية من الفجوة العديمة الشحنة إلى الفجوة الثلاثية الشحنة السالبة ، مستوياتها الطاقوية داخل العصابة

الممنوعة للجيرمانيوم هي  $E_V+0.27\text{eV}$  ل  $V(-/0)$  ،  $E_V+0.42\text{eV}$  بالنسبة ل  $V(2-/ -)$  ،  $E_V+0.49\text{eV}$  ل  $V(3-/2-)$  [12].  
 بدراسة الجيرمانيوم المشحونة هي  $E_V+0.2\text{eV}$  بالنسبة ل  $V(-/0)$  و  $E_C-0.42\text{eV}$  بالنسبة ل  $V(2-/ -)$  ،  $E_C-0.49\text{eV}$  بالنسبة ل  $V(3-/2-)$  كما هو مبين في الشكل أدناه [13].



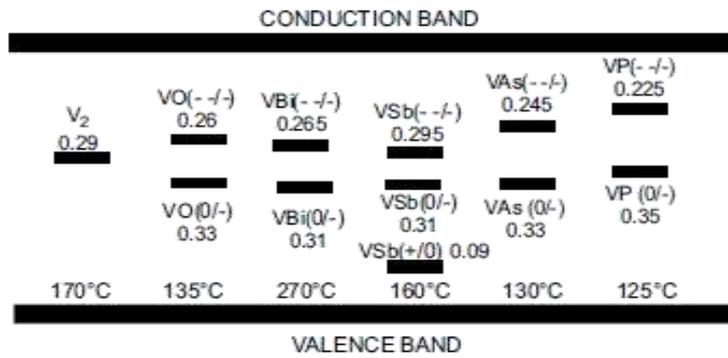
الشكل(13):مستويات فجوات الجيرمانيوم المشحونة.

كما توجد دراسات حول الثنائيات المشكلة من فجوة جيرمانيوم ومطعمة من عناصر العمود الخامس للجدول الدوري للعناصر لمندليف مثل الفسفور و الأنتيموان و الأرسونيك ، هذه الثنائيات تدعى بالمركز E يمكنها أن تعطي لمحة على فجوات الجيرمانيوم بمختلف حالاتها الشحنية.

أنجز Janke دراستين حول انتشار الفسفور والمركب  $P_xV_y$  في الجيرمانيوم [14, 15]. المحاكاة التي أنجزها أظهرت جليا وجود المراكز  $PV, PV^+, PV^-, PV^{2-}$  . وبما أن الفسفور ذرة مانحة حيث إلكترونها الخامس يكون متحررا فهي فعالة كهربائيا وحاملة لشحنة موجبة (+). تنتج هذه المراكز عن ارتباط بين  $P^+$  وفجوات حاملة لشحنات مختلفة  $(0, -2, -3)$ .

كما أجريت عدة دراسات تجريبية حول عينات من الجيرمانيوم مطعمة بالفسفور أو بالأنتيموان أو بالأرسونيك أو بالبيزموث. أخضعت هذه العينات إلى إشعاعات الكترونية لتشكيل المراكز E في درجات حرارة منخفضة جدا، وذلك لتفادي تفككها [23-18,17,16].

بينت الملاحظات التجريبية للمراكز E في هذه الدراسات أن حالاتها الشحنية الممكنة (+,0,-,2-) لفجوة ثلاثية الشحنة السالبة إضافة إلى الفجوات الأحادية والثنائية السالبتين. للفجوة ثلاثية الشحنة السالبة مستوى طاقي في أعلى العصابة الممنوعة للجيرمانيوم.

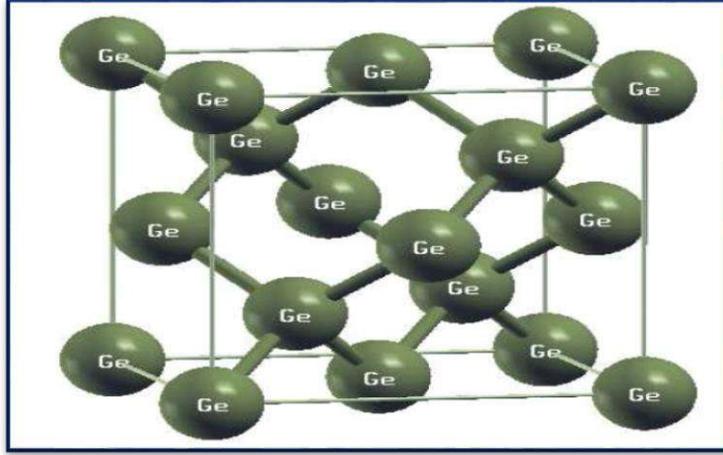


الشكل(14): يبين حالات المراكز E في العصابة الممنوعة للجيرمانيوم مأخوذ من المرجع [16].

## 5.2 خواص الجيرمانيوم :

### 1.5.2 البنية البلورية :

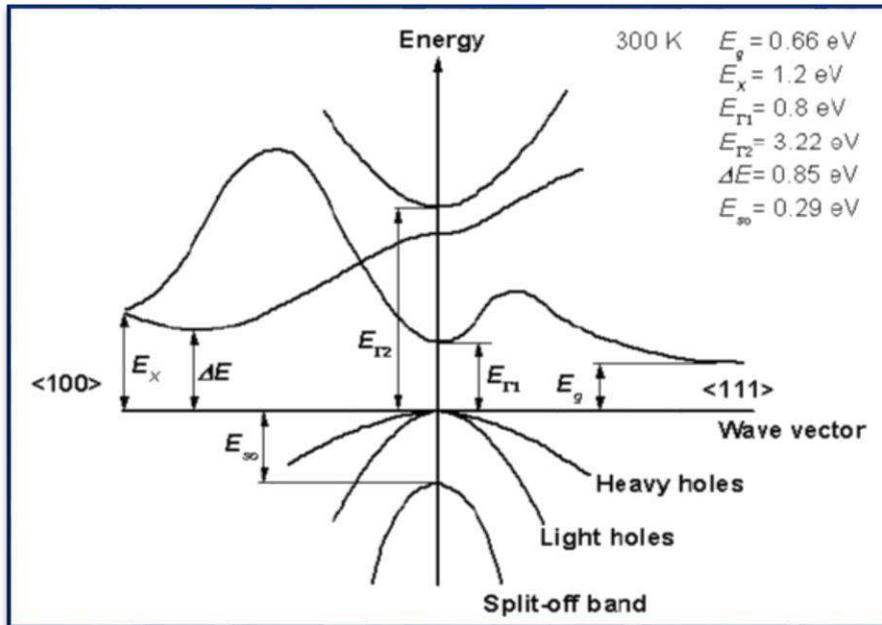
الجيرمانيوم مثل السيليسيوم ذو بنية الماسية يمكن اعتبارها شبكتين بلوريتين من نوع مكعب ممرکز الأوجه (Fcc) Face - centred cubic متداخلتين فيما بينهما، حيث تنزاح الأولى عن الثانية ب  $(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4})$  على طول القطر الرئيسي القاعدة الأولية لبنية الألماس ، تملك ذرتين تعرفان بالإحداثيات (0 0 0) و  $(\frac{1}{4} \frac{1}{4} \frac{1}{4})$  مرتبطة في كل نقطة من الشبكة Fcc وكل خلية أولية لشبكة الألماس تحتوي على 8 ذرات ، كل ذرة تملك 4 جوار أقرب و 12 جوار أقرب ثانوي مرتبطة مع بعضها بروابط تكافئية [4,24].



الشكل (15): البنية البلورية للجيرمانيوم.

### 2.5.2 الفاصل الطاقي :

يتم تحديد الفاصل الطاقي بالاعتماد على منحنيات تغيرات الطاقة  $E$  لالالكترونات وشعاع الموجة  $K$  ، بالإضافة إلى أن هذه المنحنيات هي المحدد الأساسي للخواص الفيزيائية للمواد فدرجة امتلاء عصابة النقل  $Bc$  واحتمالية تطابقها مع عصابة التكافؤ  $Bv$  تحدد إذا ما كانت المادة ناقلة، نصف ناقلة أو عازلة [4].



الشكل (16): مخطط عصابات الطاقة للجيرمانيوم .

الفاصل الطاقي للجرمانيوم يتغير وفق العلاقة التالية [25,26]:

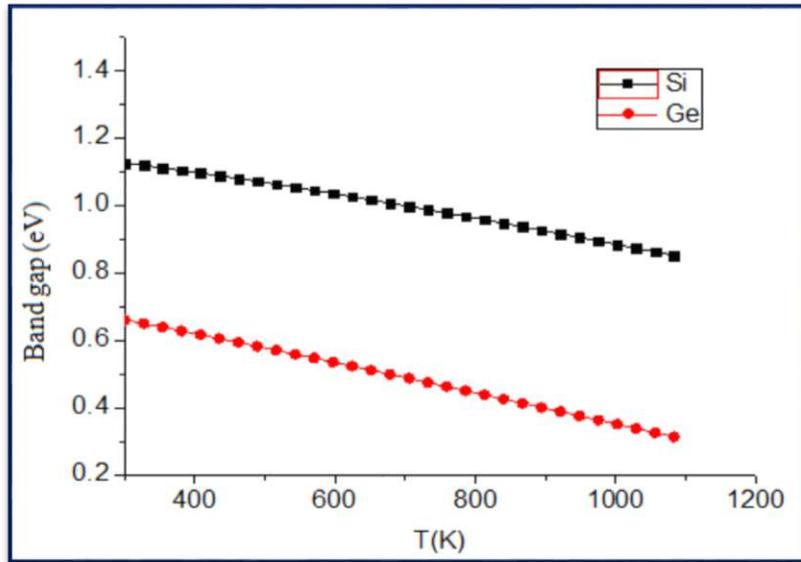
$$E_g(eV) = 0.742 - 4.8 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T + 235} \quad (1.2)$$

تقدر درجة الحرارة T بالكلفن (K) .

الشكل ( 17 ) يوضح تغيرات الفاصل الطاقي للجرمانيوم والفاصل الطاقي للسيليسيوم الذي يتغير وفق العلاقة

التالية [27]:

$$E_g(eV) = 1.17 - 4.73 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T + 663} \quad (2.2)$$



الشكل (17) : تغيرات الفاصل الطاقي للجرمانيوم والسيليسيوم بدلالة درجة الحرارة .

### 3.5.2 تركيز حاملات الشحنة الذاتية :

في عملية الاتحاد تنتقل الإلكترونات من عصابة النقل BC لتتحد مع الثقوب في عصابة التكافؤ BV وهي

العملية المعاكسة لعملية الإثارة الحرارية للإلكترونات ، مما يؤدي إلى خفض في الناقلية في حالة النصف الناقل

النقي . تكون احتمالية الاتحاد متناسبة مع عدد الإلكترونات الحرة في BC وعدد الثقوب الحرة في BV . عند

درجة الحرارة  $T$  و بين عمليتي الإثارة والاتحاد توجد حالة توازن ينتج عنها تركيز معين لحاملات الشحنة [4].  
الكثافة الكلية للالكترونات في عصابة النقل والثقوب في عصابة التكافؤ عند التوازن الحراري تعطى وفق العلاقات التالية [4,28]:

$$n = \frac{2}{h^3} (2\pi m_e KT)^{\frac{3}{2}} \exp\left[-\frac{E_c - E_F}{KT}\right] \quad (3.2)$$

$$p = \frac{2}{h^3} (2\pi m_h KT)^{\frac{3}{2}} \exp\left[-\frac{E_F - E_v}{KT}\right] \quad (4.2)$$

ومن قانون فعل الكتلة نجد :

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (5.2)$$

في الحالة الذاتية تكون :

$$n = p = n_i \quad (6.2)$$

تركيز حاملات الشحنة الذاتية تكون كالتالي :

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \exp\left[-\frac{E_g}{2KT}\right] \quad (7.2)$$

$N_c$  تمثل الكثافة الفعالة للالكترونات في عصابة النقل .

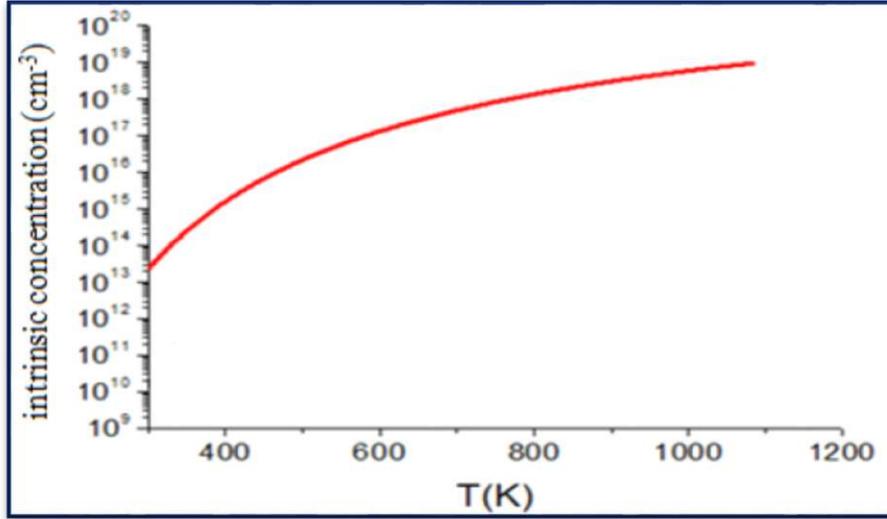
$N_v$  تمثل الكثافة الفعالة للثقوب في عصابة التكافؤ .

$n_i$  تمثل كثافة حاملات الشحنة الذاتية في النصف الناقل النقي .

تعطى كثافة حاملات الشحنة الذاتية للجيرمانيوم وفق العلاقة التالية [28]:

$$n_i(\text{cm}^{-3}) = \sqrt{3.10 \times 10^{22} T^3 \exp\left[-\frac{0.785}{KT}\right]} \quad (8.2)$$

الشكل (18) يوضح تغيرات كثافة حاملات الشحنة الذاتية للجرمانيوم عند مختلف درجات الحرارة :



الشكل (18) : يوضح منحنى تغيرات كثافة حاملات الشحنة للجرمانيوم بدلالة درجة الحرارة.

جدول (1) : بعض خواص الجرمانيوم :

ألماسية	البنية البلورية	
5.32	الكثافة ( $\text{g/cm}^{-3}$ )	
0.66	عرض العصابة الممنوعة $E_g$ (ev)	
937	نقطة الانصهار $T_m$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	
$4,42.10^{22}$	تركيز الذرات $\text{atom/cm}^3$	
$2,4.10^{13}$	التركيز الذاتي لحاملات الشحنة	
3900	$\mu_e$	حركية حاملات الشحنة ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )
1900	$\mu_p$	

## 6.2 خلاصة:

الجيرمانيوم عنصر شبه فلزي نادر يتواجد بشكل خامات في الطبيعة ، أين يتم الاعتماد على طرق معينة من أجل تنقيته و الحصول على سبيكة من الجيرمانيوم عالية النقاء . الجيرمانيوم له فاصل طاقي قصير مقارنة بالسيليسيوم وله خصائص مميزة جعلت منه مرشحا واعدة لتعويض السيليسيوم .

## المراجع

[1] Cor Claeys , Eddy Simoen , " Germanium-Based Technologies : From materials to devices " , edition bc. Claeys and E. smoen. Elsevier, Amsterdam.2007.

[2] Kazuhiko Asai. Ph.D , " Miracle Cure Organic Germanium" , Japan Publications, 1981.

[3] Akram Amir ElAli , " Germanium " , 2009 , [www.akramir.com](http://www.akramir.com) .

[4] عبد القادر سويقات ، " دراسة لنصف الناقل الجيرمانيوم المطعم للاستعمال في المكونات الالكترونية الضوئية" ، الجزائر – ورقلة ، 2016.

[5] د.حسن بوزيان ، "دراسة كيميائية تحليلية مفصلة لعناصر الجدول الدوري" ، المنظمة العربية للتربية والثقافة والعلوم ، تونس ، ص.159-160 ، 2017 .

[6] Raphaelle Escoube , Olivier J.Rouxel , Béatrice Luais , Emmanuel Ponzevera and Olivier F X. Donard , " An Intercomparison Study of Germanium Isotope Composition of Geological Reference Materials " , Geostandards and Geoanalytical Research , France ,2011.

[7] E. Talik and M. Oboz , " Czochralski Method for Crystal Growth of Reactive Itermetallics" , Institute of Physics , University of Silesia , Poland ,2013.

[8] D.Cochet-Muchy," Growth of piezoelectric crystals by czochralski method " , journal de physique IV , jpa-00252473.1994.

[9] Dr.S.Paramuraman," Lecture 21 : Silicon Wafer manufacturing" , <https://nptel.ac> > coures > lect21.

[10] دكتوراه دولة. هامل عبد الوهاب ، " تطوير نموذج السطح المسنن للخلايا الشمسية للحصول على مردود طاقي عالي"، جامعة باجي مختار -عنابة ، 2010 .

[11] S. Brotzmann and H. Bracht: « Intrinsic and extrinsic diffusion of phosphorus, arsenic, and antimony in germanium», *Appl. Phys.* **103**, 033508 (2008).

[12] M.J. Puska: « Electronic structures of point defects in III-V compound semiconductors», *J. Phys: Condens. Matter* **1**, pp 7347-7366 (1989).

[13] J. Coutinho, R. Jones, V.J.B. Torres, M. Barroso, S. Oberg and P.R. Briddon: «Electronic structure and Jahn–Teller instabilities in a single vacancy in Ge», *J. Phys: Condens. Matter.* **17**, pp L521-L527 (2005).

[14] C. Janke, R. Jones, S. Oberg et P.R. Briddon : «Ab initio investigation of phosphorus diffusion paths in germanium », *Physical Review B* **77**, 195210 (2008).

[15] C. Janke, R. Jones, J. Coutinho, S. Oberg et P.R. Briddon : « Ab initio investigation of phosphorus and boron diffusion in germanium », *Materials Science in Semiconductor Processing*, **11**(5)324 (2008).

[16] A.R. Peaker, A. Satta, V.P. Markevich, E. Simoen and B. Hamilton: «Germanium ... The Semiconductor of Tomorrow», *AIP Conf. Proc.* **866**,3(2006).

[17] V. P. Markevich, A. R. Peaker, V. V. Litvinov, V. V. Emtsev, and L. I. Murin: «Electronic properties of antimony-vacancy complex in Ge crystals», *J. Appl. Phys.* **95**, 4078 (2004).

[18] J. Fage-Pedersen, A. Nylandsted Larsen et A. Mesli : « Irradiation-induced defects in Ge studied by transient spectroscopies » *Physical Review* **62**(15), pp 10116-10125 (2000).

[19] V.P. Markevich, I.D. Hawkins, A.R. Peaker, K.V. Emtsev, V.V. Emtsev, V.V. Litvinov, L.I. Murin et L. Dobaczewski : « Vacancy–group-V-impurity atom pairs in Ge crystals doped with P, As, Sb, and Bi », *Physical Review B* **70**, 235213 (2004)

[20] A.R. Peaker, V.P. Markevich, F.D. Auret, L. Dobaczewski et N. Abrosimov : « The vacancy–donor pair in unstrained silicon, germanium and SiGe alloys », *Journal of Physics: Condensed Matter* **17**, pp S2293-S2302 (2005).

[21] A. Nylandsted Larsen et A. Mesli : « The hidden secrets of the E-center in Si and Ge », *Physica B* **401-402**, pp 85-90 (2007).

[22] V.P. Markevich : « A comparative study of ion implantation and irradiation-induced defects in Ge crystals », *Materials Science in Semiconductor Processing* **9**(4-5), pp 589-596 (2006).

[23] A.R. Peaker, V.P. Markevich, L.I. Murin, N. Abrosimov et V.V. Litvinov : « Ion implantation and electron irradiation damage in unstrained germanium and silicon germanium alloys », *Materials Science and Engineering B* **124-125**, pp 166-169(2005).

[24] د. محمد أمين سليمان ، د. أحمد فؤاد باشا ، د. شريف أحمد خيرى ، " فيزياء الجوامد" ، دار الفكر العربي ، القاهرة ، ص. 38. ص. 79. ، 1434 هـ – 2013 م .

[25] Thomas Canneaux , " Etude de la diffusion des dopants usuels dans le germanium " , thèse Doctorat de l'université de Stasbourg.2009.

[26] IOFFE , " New Semiconductor Materials , Characteristics and Properties " , Archiveélectronique , <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/Ge>.

[27] Frédéric Boucard , " Modélisation de la diffusion des dopants dans le silicium pour la réalisation de jonctions fines " ,thèse de doctorat , université Louis Pasteur-Starbourg.2003.

[28] N. Moriya , L.C. Feldman , H.S.Luftman, C.A.King ,J.BEVK , and B. Freer," Boron Diffusion in Strained  $\text{Si}_x\text{Ge}_{(1-x)}$  Epitaxial layers " , phys. Review .Lett. 71(6) ,883.1993.

الفصل الثالث :  
تطعيم الجيرمانيوم

## تمهيد:

ان عملية التطعيم في النصف الناقل هي مرحلة تكنولوجية ذات أهمية بالغة لانجاز المركبات الالكترونية والالكترونية الضوئية. نسلط الضوء في هذا الفصل على أحد الطرق المستعملة في التطعيم والمتمثلة في الانتشار، حيث سنتعرض إلى آلية انتشار الفسفور في الجيرمانيوم و إلى معامل الانتشار الذاتي.

## 1.3 طرق التطعيم :

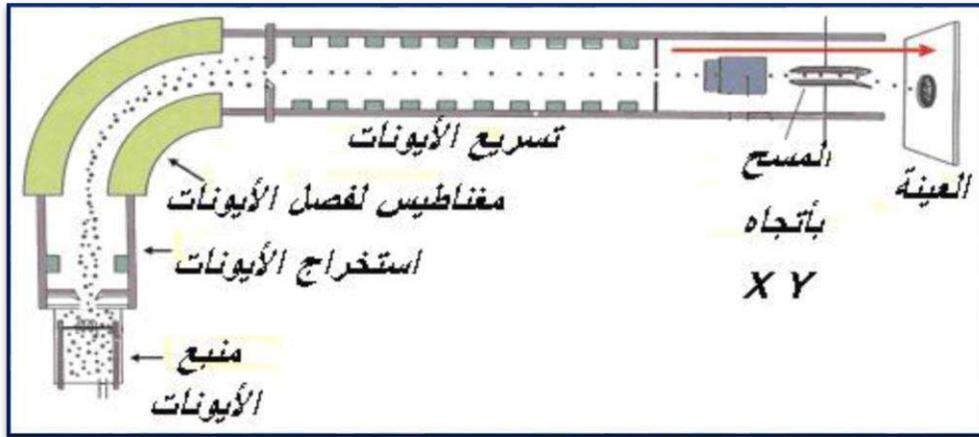
ان تطعيم نصف ناقل معين بالشوائب هو عنصر مفتاحي يؤدي إلى تغير في خصائصه الكهربائية، والتي تمثل أساسا في تغير كثافة حاملات الشحنة وعليه سنتعرف إلى أهم هذه الطرق وأكثرها شيوعا واستعمالا.

## 1.1.3 الغرس الأيوني: Ion implantation

ان الدراسات حول فاعلية تقنية الغرس الأيوني بدأت فكرته على السطح الصلب سنة 1900 ، ونفذت في حدود سنة 1951 عن طريق العالم Schockly وهو أحد مخترعي الترانزيستور ، وفي حدود سنة 1992-1993 انتشرت وتعددت الدراسات حول هذه التقنية سنة 1967-1968 [1].

هذه العملية التكنولوجية تركز على قذف مادة (الهدف) بذرات مشحونة، وذلك من خلال توفير طاقة كافية للأيونات لتمكن من التغلغل في الهدف والوصول إلى عمق المادة بعيدا عن السطح . يقدر جهد تسريع الأيونات ببعض الكيلو إلكترون فولط ( Kev ) عندما يتم الزرع بواسطة البلازما ، ويصل إلى بعض الميغا إلكترون فولط (Mev) في حالة الزرع بطاقة عالية . تم إدراج هذه التقنية لتحل محل العملية التقليدية ( الانتشار الحراري ) في درجة حرارة عالية لتطعيم أنصاف النواقل ولانجاز عملية الغرس لأیوني نستعمل جهاز الغرس الأیوني ، والذي يتألف من مصدر للأيونات بحيث هذه الأخيرة يجب ان تملك كتلة ،جرعة و طاقة محددة بدقة ، ومن مسرع

الجسيمات الذي يعمل على تسريع الايونات ضمن الحقل الكهربائي إلى سرعات مرتفعة الطاقة. بالإضافة إلى حجرة الهدف أين يتم اصطدام القذائف بمادة الهدف والمتمثل في الجسم الصلب. ان من أجل الكشف وتحديد الشحنات المتراكمة من الايونات المغروسة نقوم بتوصيل جهاز كاشف بسطح الهدف مما يمكن من قياس الجرعة بشكل متواصل وإيقاف العملية عند الحصول على المقدار المطلوب من الجرعة [2,1].



الشكل (19) : رسم توضيحي لجهاز الغرس الايوني .

### 2.1.3 الانتشار الحراري :

هناك مجالين مميزين يتم فيهما الانتشار هما [2]:

مجال الانتشار الذاتي : يكون تركيز الشوائب في هذا المجال مهملاً بالمقارنة ، مع حاملات الشحنة الذاتية و يكون

$$n = n_i$$

مجال الانتشار اللاذاتي : في هذا المجال تكون العينة مطعمة بقدر كبير وعليه يكون تركيز الشوائب معتبر مقارنة

بتركيز حاملات الشحنة الذاتية .

في هذه الطريقة يتم التطعيم وفق مرحلتين [2]:

التموضع المسبق : في وسط مشبع بالشوائب المطعمة ذات تركيز ثابت نضع صفائح الجيرمانيوم ونبقيها لمدة

زمنية معينة وتحت درجة حرارة ثابتة .

في حالة التوزيع المسبق : نرفع صفائح الجيرمانيوم من الوسط المشبع بالشوائب ونضعها في درجات حرارة عالية

لكي تصل الشوائب المطعمة إلى مناطق أكثر عمقا في شرائح الجيرمانيوم .

### 2.3 منابع الشوائب المطعمة :

يمكن تصنيف منابع الشوائب المطعمة إلى ثلاثة حالات فيزيائية والتي تتمثل في الحالة الصلبة ,السائلة أو الغازية

لهذه الشوائب ومن خلال الجدول(2) أدناه يمكن التعرف على أهم المركبات [2] .

الجدول (2): يوضح منابع المطعومات.

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

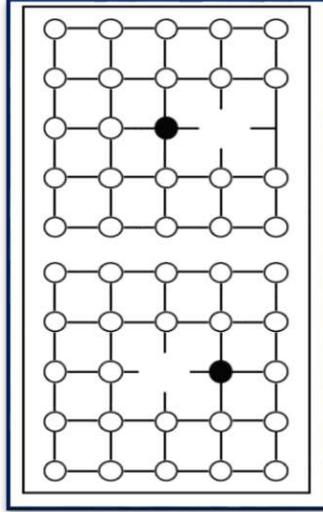
### 3.3 آلية الانتشار المجهرية للفسفور في الجيرمانيوم :

ينتشر الفسفور في الجيرمانيوم وفق الآلية الفجوية (vacancy mechanism) ، حيث يعتمد هذا الانتشار

على وجود الفجوات ( الشكل 20). بوجود فجوة في أحد مواضع الجوار الأقرب تنتقل المطعمة المتواجدة في

الموقع الاستبدالي إلى موقع الفجوة المجاور.تعرف هذه الآلية بالتبادل البسيط. في حالة وجود قوة تجاذب بين

المطعمة والفجوة يقيان مرتبطين مع بعضهما البعض و يشكلان ثنائية فجوة-مطعمة. هذه الثنائية تنتقل كمركب واحد في الشبكة البلورية وهو ما يدعى بالانتشار بالثنائيات [3].



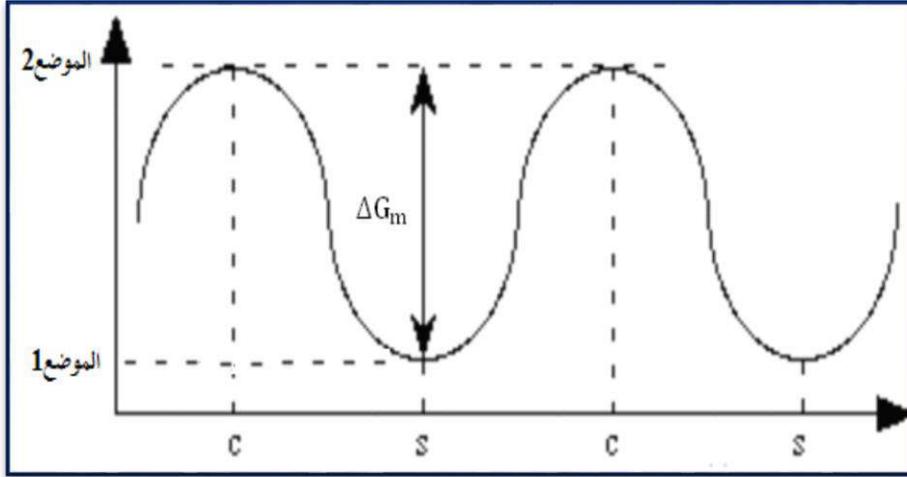
الشكل (20) : مخطط يبرز الآلية الفجوية.

### 4.3 معامل الانتشار الذاتي :

يعتبر معامل الانتشار مقدار مميز لظاهرة انتشار المادة . معامل الانتشار الذاتي مرتبط بحالة الانتشار في المجال الذاتي لأنصاف النواقل. يكون الانتشار ذاتيا في حالة ما يكون تركيز المطعمة المنتشرة مهملا مقارنة بتركيز حاملات الشحنة الذاتية  $n_i$  ، و يكون تركيز الالكترونات في مستوى النقل للنصف الناقل مساويا لتركيز حاملات الشحنة الذاتية  $n_i$  [2].

### 1.4.3 الدراسة النظرية لمعامل الانتشار :

عند انتقال الفرد المنتشر من الموضع 1 إلى الموضع 2 يحدث تغير في طاقته الحرة مقدارها:  $\Delta G_m = G_2 - G_1$  ، حيث  $G_1$  و  $G_2$  هما على الترتيب الطاقة الحرة للفرد المنتشر في الموضع الأول و الموضع الثاني.



الشكل (21): الحاجز الكموني أثناء الانتقال من موضع إلى آخر.

$\Delta G_m$  الطاقة اللازمة لاجتياز الحاجز للوصول إلى الموضع 2 الشكل (21).

يرتبط معامل الانتشار في حالة كون الانتشار يكون محفزا بالفجوات ، بتواتر القفز  $\nu$  بالعلاقة التالية [5،4]:

$$D = f \cdot \frac{1}{6} a^2 \cdot \nu \quad (1.3)$$

يمثل  $a$  بعد الجوار الأقرب و  $f$  معامل الارتباط و  $\nu$  تواتر القفز .

حيث تواتر القفز :

$$\nu = \nu_V \cdot P_V \quad (2.3)$$

$\nu_V$  تواتر القفز للفجوة ويساوي :

$$\nu_V = \nu_0 \exp \left[ -\frac{\Delta G_V^m}{KT} \right] \quad (3.3)$$

$P_V$  هي احتمال وجود فجوة في الموضع المجاور:

$$P_V = Z \cdot \frac{C}{C_s} \exp \left[ -\frac{\Delta E_{AV}}{KT} \right] \quad (4.3)$$

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 المواقع في الشبكة البلورية

$Z$  عدد الجوار الأقرب، ( $Z=4$ ) بالنسبة للبنية الماسية

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

$$c_v = c_s \exp\left[-\frac{\Delta G_V^f}{KT}\right] \quad (5.3)$$

انطلاقاً من العلاقات السابقة نحصل على مايلي:

$$v = zv_0 \exp\left[-\frac{\Delta G_V^m}{KT}\right] \cdot \exp\left[-\frac{\Delta G_V^f - E_{AV}}{KT}\right] \quad (6.3)$$

$$v = zv_0 \exp\left[-\frac{\Delta G_V^f + \Delta G_V^m - E_{AV}}{KT}\right] \quad (7.3)$$

عندئذ يكتب معامل الانتشار على النحو التالي:

$$D = f \cdot \frac{4}{6} a^2 \cdot v_0 \exp\left[-\frac{\Delta G_V^f + \Delta G_V^m - E_{AV}}{KT}\right] \quad (8.3)$$

$$D = f \cdot \frac{4}{6} a^2 \cdot v_0 \exp\left[-\frac{\Delta S_V^f + \Delta S_V^m}{T}\right] \exp\left[-\frac{\Delta H_V^f + \Delta H_V^m - E_{AV}}{KT}\right] \quad (9.3)$$

تمثل:  $\Delta H_V^m$  انطالبي هجرة الفجوة .

$\Delta S_V^m$  انطروبي هجرة الفجوة .

$\Delta H_V^f$  انطالبي تكوّن الفجوة .

$\Delta S_V^f$  انطروبي تكوّن الفجوة .

وتكون عبارة معامل الانتشار من الشكل :

$$D = D_0 \exp \left[ -\frac{E}{KT} \right] \quad (10.3)$$

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

$$E = \Delta H_V^f + \Delta H_V^m - E_{AV} \quad (11.3)$$

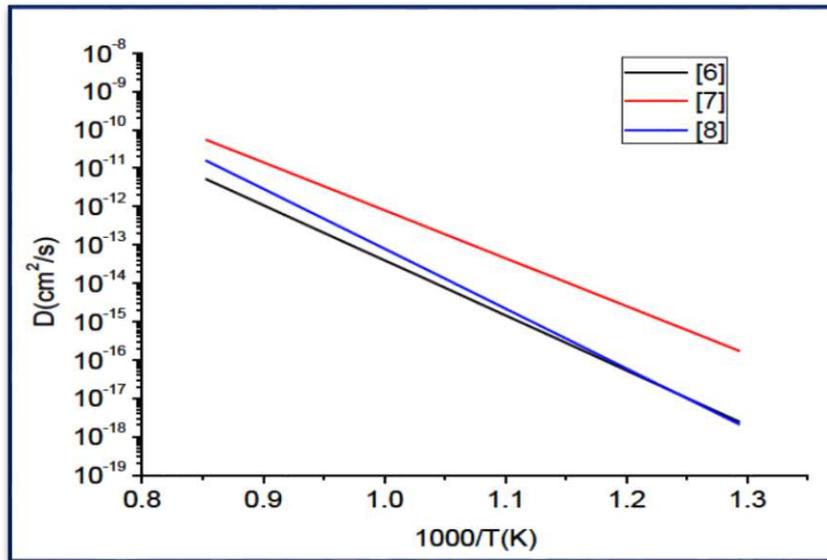
يمثل المنحنى البياني الممثل لتغيرات  $\log D = f \left( \frac{1}{T} \right)$  خطا مستقيم ميله  $-k/E$  ونقطة تقاطعه مع محور الترتيب

تمثل  $(\log)_0 D$  .

### 5.3 معامل انتشار الفوسفور في الجيرمانيوم:

هناك عدة دراسات تناولت البحث عن كيفية تغير معامل انتشار الفوسفور في الجيرمانيوم بدلالة درجة الحرارة و

استنتاج طاقة التنشيط  $E$  والحد الانطروبي  $D_0$  كما هو مبين في الجدول أدناه.



الشكل (22) : يمثل تغيرات معامل انتشار P في الجيرمانيوم حسب المراجع المذكورة.

الجدول (3): قيم الحد الأنطروي ل p وطاقة التنشيط 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]

## 6.2 خلاصة :

يكتسي تطعيم أنصاف النواقل أهمية بالغة في الصناعات الالكترونية والالكترونية الضوئية، أحد طرق المستعملة في التطعيم هي الانتشار الحراري . في هذا الفصل تطرقنا إلى تطعيم الجيرمانيوم بالفسفور بواسطة الانتشار حيث تعرضنا إلى آلية الانتشار الفجوي للفسفور في الجيرمانيوم ، و تطرقنا إلى معامل الانتشار دراسة نظرية ونتائج تجريبية تخص معامل انتشار الفسفور في الجيرمانيوم من خلال دراسات سابقة .

## المراجع

- [1] دكتوراه دولة.هامل عبد الوهاب ، " تطوير نموذج السطح المسنن للخلايا الشمسية للحصول على مردود طاقوي عالي"، جامعة باجي مختار –عنابة ، 2010 .
- [2] عبد القادر سويقات . أطروحة دكتوراه ، " دراسة لنصف الناقل الجيرمانيوم المطعم للاستعمال في المكونات الالكترونية الضوئية"، الجزائر – ورقلة ، 2016.
- [3] 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).
- [4] Scoten W.Jones: « Diffusion in Silicon », IC Knowledge LLC, copyright (2000).
- [5] 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).
- [6] B.Boltaks: « Diffusion et Défauts Ponctuels Dans Les Semi-conducteurs », Page(119,181) , Editions Mir. Moscou, (1977).
- [7] P. Laitinen: « Self- and impurity diffusion in intrinsic relaxed silicon Germanium», thèse dedoctorat, Université de Jyväskylä, Finlande (2004).
- [8] S. Brotzmann and H. Bracht: « Intrinsic and extrinsic diffusion of phosphorus, arsenic, and antimony in germanium», Appl. Phys. **103**, 033508 (2008).

الفصل الرابع :

محاكاة ونتائج

تمهيد :

إن نمذجة الانتشار يعتمد بالأساس على إيجاد عبارة معامل الانتشار الفعال ومن ثم تعويضها في معادلة القانون الثاني لـ Fick. في هذا الفصل نمذجنا انتشار الفسفور في الجيرمانيوم بالآلية الفجوية، و قمنا بإيجاد عبارة معامل الانتشار الفعال آخذين بعين الاعتبار أن فجوات الجيرمانيوم ثنائية الشحنة السالبة هي التي تساهم في انتشار الفسفور في الجيرمانيوم. قمنا بعد ذلك بحل المعادلة التفاضلية الجزئية لقانون فيك الثاني بطريقة الفروق المتناهية. قمنا بعد ذلك بمحاكاة منحنيات الانتشار الفسفور في الجيرمانيوم وعرضنا في نهاية الفصل نتائج هذه المحاكاة.

1.4 معامل الانتشار الفعال:

ينتشر الفسفور في الشبكة البلورية للجيرمانيوم نتيجة قوى محرّكة مصدرها (تدرج التركيز، حقل كهربائي داخلي) حيث يكتسب نتيجة هذه القوى المحركة سرعة متوسطة  $u$  ويكتب التدفق بالشكل [1,2] :

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x} + uc \quad (1.4)$$

يسمى الحد الأول بحد فيك ويعبر عن تدرج التركيز والحد الثاني  $c.u$  يسمى بحد نارناست .

تعطى قيمة  $u$  وفق العبارة التالية [1]:

$$u = z \mu E \quad (2.4)$$

تمثل  $\mu$  حركية الفرد المنتشر وتعطى بوحدة  $(\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1})$  ،  $z$  شحنة الفرد المنتشر التي تساوي  $+1$  في حالة الفسفور.

$E$  الحقل الكهربائي الداخلي ويعطى بوحدة  $(\text{Vcm}^{-1})$  وفق العلاقة :

$$E = -\frac{kT}{q} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (3.4)$$

تمثل  $n$  تركيز الالكترونات الحرة

من جهة ثانية حسب علاقة اينشتاين [3]:

$$\mu = \frac{qD}{kT} \quad (5.4)$$

بالتعويض في عبارة ج نجد:

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x} - Dc \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (6.4)$$

العبارة الأخيرة يمكن كتابتها على النحو التالي :

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x} - Dc \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial x} \quad (7.4)$$

$$j = -D \left( 1 + c \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial c} \right) \frac{\partial c}{\partial x} \quad (8.4)$$

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

$$n = \frac{1}{2} \left( c + \sqrt{c^2 + 4n_i^2} \right) \quad (9.4)$$

عبارة التدفق يمكن أن نعبّر عنها كالتالي :

$$j = - \left( 1 + \frac{c}{2n_i} \left( \left( \frac{c}{2n_i} \right)^2 + 1 \right)^{-1/2} \right) D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (10.4)$$

$$j = -hD \frac{\partial c}{\partial x} \quad (11.4)$$

المقدار  $h$  يدعى بمعامل التسريع الكهربائي حيث :

$$h = 1 + \frac{c}{2n_i} \left( \left( \frac{c}{2n_i} \right)^2 + 1 \right)^{-1/2} \quad (12.4)$$

المقدار  $hD$  يدعى بمعامل الانتشار الفعال :

$$D^{\text{eff}} = hD \quad (13.4)$$

$$j = -D^{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial x} \quad (14.4)$$

باعتبار أن فجوات الجيرمانيوم ثنائية الشحنة السالبة هي التي تساهم في انتشار الفسفور في الجيرمانيوم معامل

الانتشار  $D$  يعبر عنه بالعلاقة التالية [4]:

$$D = \left( \frac{n}{n_i} \right)^2 D^- \quad (15.4)$$

عندئذ معامل الانتشار الفعال يمكن كتابته على النحو التالي :

$$D^{\text{eff}} = h \left( \frac{n}{n_i} \right)^2 D^- = h \left( \frac{n}{n_i} \right)^2 D_i \quad (16.4)$$

$D^-$  ،  $D_i$  على الترتيب معامل الانتشار عبر فجوات الجيرمانيوم ثنائية الشحنة السالبة و معامل الانتشار الذاتي.

في حالة الجيرمانيوم يكون مطعما مسبقا بالغالسيوم تكون عبارة كل من كثافة الالكترونات الحرة ومعامل التسريع

الكهربائي كالتالي :

$$n = \frac{1}{2} \left( c - [Ga] + \sqrt{(c - [Ga])^2 + 4n_i^2} \right) \quad (17.4)$$

$$h = 1 + \frac{c}{2n_i} \left[ \left( \frac{c - [Ga]}{2n_i} \right)^2 + 1 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (18.4)$$

## 2.4 القانون الثاني لـ فيك :

القانون الثاني لفيك يبين التطور الزمني لتركيز الفرد المنتشر ونحصل عليه بتطبيق معادلة الاستمرار :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = - \frac{\partial j}{\partial x} \quad (19.4)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D^{eff} \frac{\partial c}{\partial x} \right] \quad (20.4)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D^{eff} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial c}{\partial x} \frac{\partial D^{eff}}{\partial x} \quad (21.4)$$

### 3.4 محاكاة منحنيات الانتشار:

محاكاة منحنيات الانتشار أنجزناها بواسطة برنامج بلغة الفورترن يعتمد هذا البرنامج على الحل العددي لقانون

فيك الثاني، وذلك بتجزئة مجال الانتشار إلى N جزء متناهي السمك و تعويض المشتقات الجزئية في المعادلة

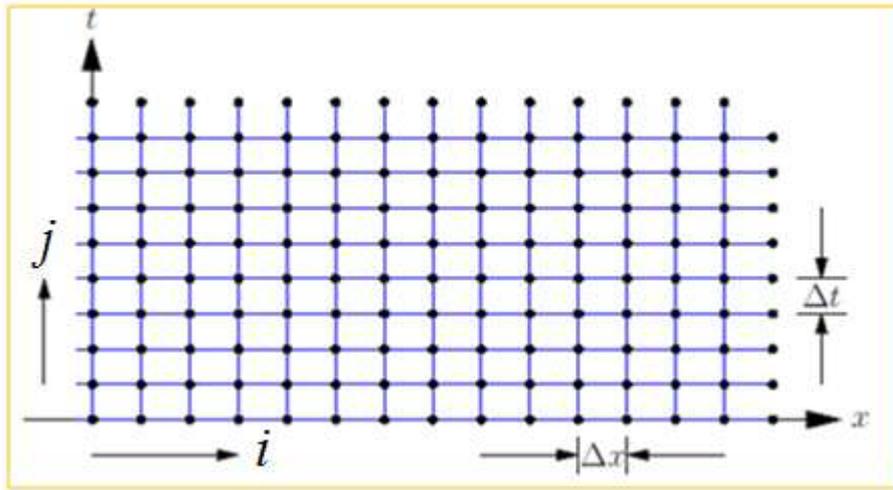
(21.4) بتقريبات الفروق المتناهية التالية:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} (c_i^j - c_i^{j-1}) \quad (22.4)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} (c_{i+1}^j - c_i^j) \quad (23.4)$$

$$\frac{\partial D^{eff}}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} \left( (D^{eff})_{i+1}^j - (D^{eff})_i^j \right) \quad (24.4)$$

$$D^{eff} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = (D^{eff})_i^j \frac{c_{i-1}^j - 2c_i^j + c_{i+1}^j}{\Delta x^2} \quad (25.4)$$



الشكل (23): يوضح تجزئة البعد وزمن الانتشار.

حيث  $i$  ،  $j$  على الترتيب دليلا البعد والزمن.  $\Delta x$  و  $\Delta t$  هما على الترتيب الخطوة البعدية والخطوة الزمنية. انطلاقا من المعادلات (21.4) - (25.4) نحصل على المعادلة العامة والتي تربط التركيز في اللحظة  $j\Delta t$  بالتركيز في اللحظة

$(j-1)\Delta t$ :

$$c_i^{j-1} = -\delta_i^j c_{i-1}^j + (1 + \delta_i^j + \delta_{i+1}^j) c_i^j - \delta_{i+1}^j c_{i+1}^j \quad (26.4)$$

$$\delta_i^j = \delta_0 (D^{\text{eff}})_i^j \quad \text{و} \quad \delta_0 = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad \text{حيث}$$

لمعالجة الشروط الحدية استخدمنا شرط اللاتدفق عند حدي مجال الانتشار وعليه فإننا نحصل على مايلي:

$$c_0^j = c_1^j \quad (27.4)$$

$$c_N^j = c_{N+1}^j \quad (28.4)$$

انطلاقاً من المعادلات (4،26) ، (4،27) ، (4،28) نحصل على نظام مصفوفي ثلاثي قطري

(tridiagonal matrix systems) يربط التراكيز في اللحظة  $j\Delta t$  بالتراكيز في اللحظة  $(j-1)\Delta t$  من الشكل

حيث  $\mathbf{Bc}=\mathbf{a}$ :

$$, \mathbf{c} = \begin{pmatrix} c_1^j \\ c_2^j \\ c_3^j \\ \dots \\ c_i^j \\ \dots \\ c_k^j \end{pmatrix}, \mathbf{a} = \begin{pmatrix} c_1^{j-1} \\ c_2^{j-1} \\ c_3^{j-1} \\ \dots \\ c_i^{j-1} \\ \dots \\ c_k^{j-1} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1+\delta_2^j & -\delta_2^j & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\delta_2^j & 1+\delta_2^j+\delta_3^j & -\delta_3^j & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & -\delta_3^j & 1+\delta_3^j+\delta_4^j & -\delta_4^j & 0 & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & 0 & -\delta_i^j & 1+\delta_i^j+\delta_{i+1}^j & -\delta_{i+1}^j & 0 & \dots \\ \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 & -\delta_k^j & 1+\delta_k^j \end{pmatrix}$$

الحل العددي للنظام المصفوفي الثلاثي القطري الذي تحصلنا عليه، تم باستخدام خوارزمية توماس (Thomas

Algorithm)، والتي تقوم أساساً على طريقة التفكيك (LU decomposition Method).

خلال المحاكاة اعتبرنا تركيز المطعومات على سطح عينة الجيرمانيوم ثابتاً خلال الانتشار. قيم تركيز حاملات

الشحنة الذاتية الموافقة لدرجة حرارة الانتشار تم اختيارها وفقاً للمرجع [4].

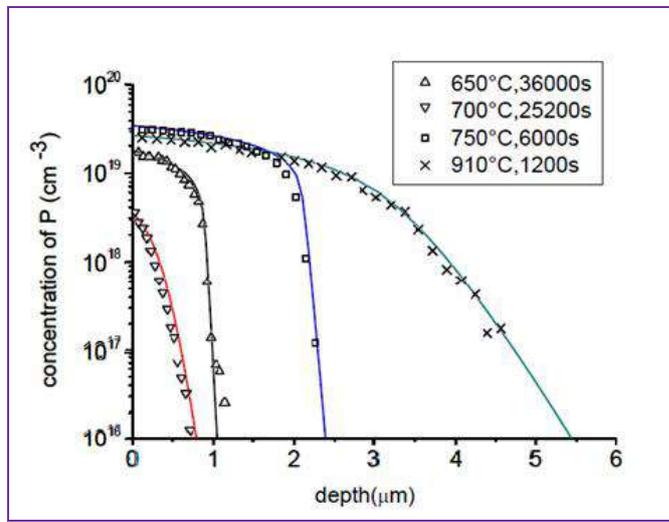
خلال محاكاة المنحنيات التجريبية اخترنا قيم معامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجة حرارة الانتشار التي تحقق تطابق

منحنيات المحاكاة مع المنحنيات التجريبية.

#### 4.4 نتائج ومناقشة :

##### 1.4.4 محاكاة المنحنيات التجريبية و مقارنتها :

يوضح الشكل (24) المنحنيات التجريبية و المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة لانتشار الفسفور في الجيرمانيوم عند درجة حرارة معينة ومدة زمنية معينة. نلاحظ مدى تطابق منحنيات المحاكاة مع منحنيات التجريبية مما يبين أن نموذج الانتشار بالفجوات الثنائية الشحنة السالبة يصف بدقة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم .



الشكل(24): المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة ( الخطوط المستمرة ) والمنحنيات التجريبية (المرجع [4]) لانتشار

الفسفور في الجيرمانيوم

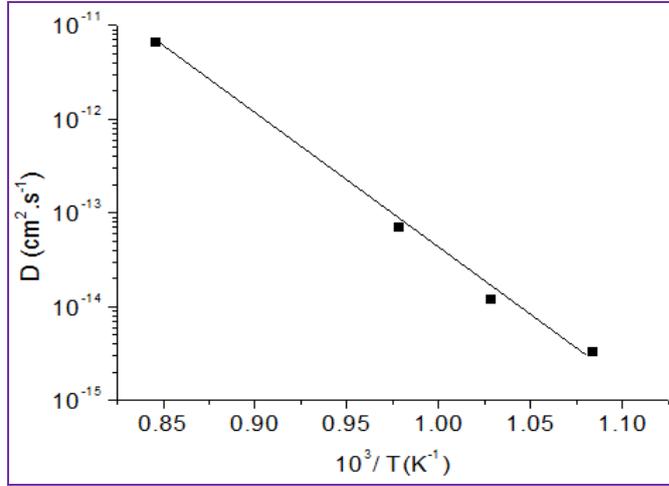
الجدول (4) : قيم التركيز الابتدائي على السطح ، معامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة انتشار

الفسفور في الجيرمانيوم المستعملة في المحاكاة.

$c_s$ (cm <sup>-3</sup> )	T (c°)	$D_i$
$1.8 * 10^{19}$	650	$3.4 * 10^{-15}$
$5.3 * 10^{18}$	700	$1.2 * 10^{-14}$
$3.5 * 10^{19}$	750	$7.18 * 10^{-14}$
$2.7 * 10^9$	910	$6.7 * 10^{-12}$

يبين الشكل (25) تغيرات معامل الانتشار الذاتي للفسفور في الجيرمانيوم بدلالة مقلوب درجة الحرارة ، وذلك

انطلاقاً من معطياتنا المستعملة في المحاكاة المبينة في الجدول (3).



الشكل (25) : تغيرات معامل الانتشار الذاتي مع مقلوب درجة الحرارة.

من خلال تغيرات معامل الانتشار الذاتي للفسفور في الجيرمانيوم بدلالة مقلوب درجة الحرارة ، وجدنا أن هذا

الأخير يرتبط بدرجة الحرارة وفق العلاقة التالية :

$$D = 20 \exp - \frac{2.93(eV)}{KT}$$

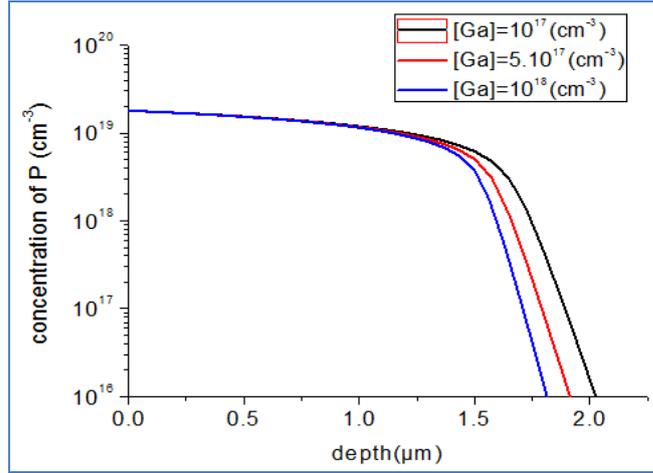
تمثل القيمة 2.93 eV طاقة التنشيط لانتشار الفسفور عبر الفجوات الثانية الشحنة السالبة .

#### 2.4.4 دراسة العوامل المؤثرة على انتشار الفسفور في الجيرمانيوم :

##### 1.2.4.4 تأثير التطعيم المسبق :

يوضح الشكل (26) منحنيات انتشار الفسفور في الجيرمانيوم المطعم مسبقاً بالغالسيوم بتركيز مختلفة . من الواضح

أن التطعيم المسبق له تأثير على الانتشار ، فكلما زاد تركيز الغاليوم في الجيرمانيوم قل عمق الانتشار .



الشكل (26): يبين تأثير التطعيم المسبق بالغالسيوم على انتشار الفسفور في الجيرمانيوم.

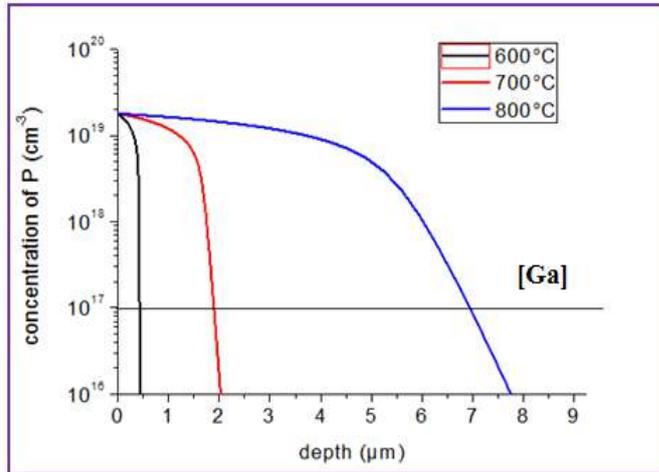
الجدول (5): يبين المقادير المستعملة في هذه المحاكاة .

T(c°)	700	700	700
c <sub>s</sub> (cm <sup>-3</sup> )	1.8 × 10 <sup>19</sup>	1.8 × 10 <sup>19</sup>	1.8 × 10 <sup>19</sup>
t(s)	36000	36000	36000
[Ga](cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>17</sup>	5 × 10 <sup>17</sup>	10 <sup>18</sup>

#### 2.2.4.4 تأثير درجة الحرارة :

الشكل (27) يوضح تأثير درجة الحرارة على انتشار الفسفور في الجيرمانيوم . نلاحظ أنه كلما زدنا من درجة

الحرارة يزداد عمق الانتشار .



الشكل (27) : تأثير درجة الحرارة على انتشار الفسفور في الجيرمانيوم .

الجدول (6) : قيمة التركيز الابتدائي على السطح ، قيمة تركيز الغاليوم في الجرمانيوم ، درجات الحرارة وزمن انتشار

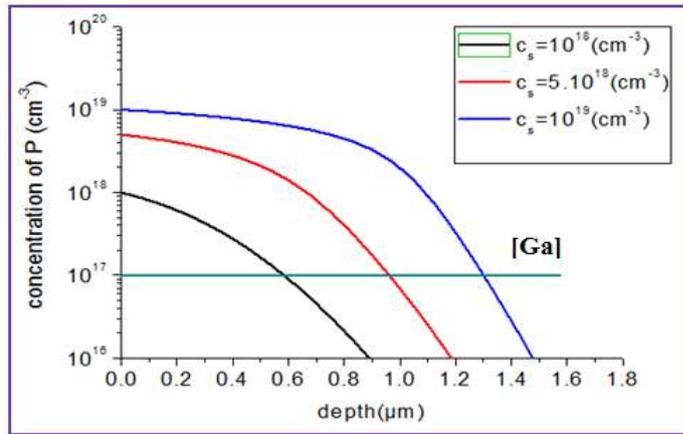
الفسفور في الجرمانيوم المطعم بالغاليوم .

T(c°)	600	700	800
c <sub>s</sub> (cm <sup>-3</sup> )	1.8 × 10 <sup>19</sup>	1.8 × 10 <sup>19</sup>	1.8 × 10 <sup>19</sup>
t (s)	36000	36000	36000
[ga] (cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>17</sup>	10 <sup>17</sup>	10 <sup>17</sup>

#### 3.2.4.4 تأثير التركيز على السطح:

يوضح الشكل (28) تأثير تركيز الفسفور على السطح على عمق الانتشار . نلاحظ أنه كلما ما زدنا من تركيز

الفسفور على السطح ازداد عمق انتشار الفسفور في الجيرمانيوم .



الشكل(28) : تأثير التركيز على السطح على الانتشار.

الجدول (7): قيم التراكيز على السطح ، قيمة تركيز الغاليوم في الجيرمانيوم ، درجة الحرارة وزمن انتشار الفسفور في

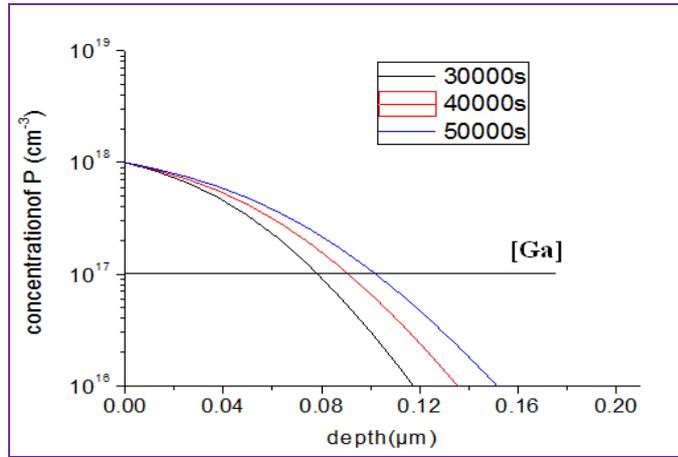
الجرمانيوم المطعم بالغاليوم .

T(c°)	700	700	700
c <sub>s</sub> (cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>18</sup>	5 × 10 <sup>18</sup>	10 <sup>19</sup>
t(s)	36000	36000	36000
[Ga](cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>17</sup>	10 <sup>17</sup>	10 <sup>17</sup>

#### 4.2.4.4 تأثير الزمن:

يوضح الشكل (29) تأثير الزمن على انتشار الفسفور في الجيرمانيوم بين المنحنى أنه كلما ازداد الزمن يزداد عمق

الانتشار .



الشكل (29) : تأثير الزمن على الانتشار.

الجدول (8) : قيمة التركيز الابتدائي على السطح ، قيمة تركيز الغاليوم في الجرمانيوم ، درجة الحرارة و أزمنة انتشار

الفسفور في الجرمانيوم المطعم بالغاليوم .

T(c°)	600	600	600
c <sub>s</sub> (cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>18</sup>	10 <sup>18</sup>	10 <sup>18</sup>
t(s)	30000	40000	50000
[Ga](cm <sup>-3</sup> )	10 <sup>17</sup>	10 <sup>17</sup>	10 <sup>17</sup>

5.4 الخلاصة :

بعد نمذجة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم بالآلية الفجوية اخذين بعين الاعتبار مساهمة الفجوات ثنائية الشحنة السالبة في الجيرمانيوم ومحاكاة منحنيات التجريبية تبين لنا أن نموذج الانتشار عبر هذه الفجوات يصف بدقة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم و استنتجنا أن طاقة التنشيط للفسفور في الجيرمانيوم 2.93 eV. توصلنا من خلال الدراسة المبينة في الشكل (26)، (27)، (28) و (29) أن التطعيم المسبق ودرجة الحرارة والتركيز على السطح والزمن هي عوامل مؤثرة على عمق الانتشار تحديدها ضروري من أجل التحكم في عمق الوصلة (p-n) مما يمكن من تحقيق مركب الكتروني دقيق.

## المراجع

- [1] Daniel Mathiot , " Dopage et diffusion dans le Silicium", In ESS, UMR 7163 , Laboratoire Commun CNRS-ULP , 2004.
- [2] E. D. Allen, J. R.King and M. G.Meere, " Impurity Diffusion Through Strained Semiconductors" , Appl. Math, Vol 58 (4), 616. 2005.
- [3] J.R.King,and C.P.Please," Diffusion of Dopants in Crystalline Silicon : An Asymptotic Analysis " , Ima Journl of Appl.Math.37,185-197.1986.
- [4] S. Brotzmann and H. Bracht, " Intrinsic and extrinsic diffusion of phosphorus , arsenic, and antimony in germanium " , Appl, Phys .103. 033508 .2008.

## الخاتمة العامة

تكتسي عملية تطعيم أنصاف النواقل أهمية بالغة في عصرنا الحالي، لما تلعبه من دور مهم في تكنولوجيا الصناعة الالكترونية والالكترونية الضوئية، في هذا الإطار قمنا في هذه المذكرة إلى التطرق إلى أحد وسائل المستخدمة في التطعيم ألا وهي الانتشار من خلال دراسة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم، فبعد نمذجة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم بالآلية الفجوية آخذين بعين الاعتبار مساهمة الفجوات ثنائية الشحنة السالبة في هذا الانتشار، ومحاكاة منحنيات الانتشار التجريبية ودراسة مختلف العوامل المؤثرة لهذا الانتشار توصلنا إلى ما يلي :

- انتشار الفسفور في الجيرمانيوم يتم بالآلية الفجوية بشكل أساسي عبر فجوات الجيرمانيوم ثنائية الشحنة السالبة.

- طاقة التنشيط للفسفور في الجيرمانيوم تقدر ب  $2.93 \text{ eV}$ .

- يتأثر عمق الانتشار بالتطعيم المسبق، درجة الحرارة، التركيز على السطح و الزمن حيث :

• كلما زاد تركيز الغاليوم في الجيرمانيوم قل عمق الانتشار .

• زيادة كل من درجة الحرارة، التركيز على السطح و زمن الانتشار يزيد من عمق الانتشار .

في نهاية هذا العمل يبقى الأمل قائما في استمرار عملية البحث العلمي الفعال في ميدان أنصاف النواقل، وذلك

لما لها من خصائص عديدة وتطبيقات مغرية أهلتها لاعتلاء مرتبة مهمة لدى الباحثين، بهدف تحسين خواصها من

أجل الاستغلال الأمثل في مختلف الأجهزة الالكترونية والتطبيقات العلمية .

## الملخص:

يهدف هذا العمل إلى دراسة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم و معرفة العوامل المؤثرة على هذا الانتشار. فبعد نمذجة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم بالآلية الفجوية آخذين بعين الاعتبار مساهمة الفجوات ثنائية الشحنة السالبة ومحاكاة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم، وجدنا أن طاقة التنشيط للفسفور في الجيرمانيوم تقدر ب 2.93 eV، وأن عمق الانتشار يقل بزيادة التركيز المسبق للغاليوم في الجيرمانيوم ويزداد بزيادة كل من درجة الحرارة، التركيز على السطح و زمن الانتشار.

**الكلمات المفتاحية:** الفسفور، الانتشار، الفجوات ثنائية الشحنة السالبة، الآلية الفجوية.

## Abstract :

This work aims to study the diffusion of phosphorus in Germanium and knowing the factors influencing in this diffusion. After modeling the diffusion of phosphorus in Germanium by the vacancy mechanism taking into account the contribution of doubly negatively charged vacancies and the simulation of diffusion of phosphorus in Germanium, we found that the phosphorus activation energy in germanium is estimated at 2.93 eV and that the diffusion depth decreases by increasing the pre-concentration of gallium in germanium and increasing by increasing the temperature and diffusion time.

**Keywords:** phosphorus, diffusion, double negative charge vacance, vacancy mechanism.

## Résumé :

Ce travail vise à étudier la diffusion de phosphore dans le Germanium et de connaître les facteurs qui influencent cette diffusion. Après avoir modélisé la diffusion du phosphore dans le Germanium par le mécanisme lacunaire en tenant compte de la contribution des lacunes doublement chargés négativement et simuler la diffusion du phosphore dans le Germanium, nous avons constaté que l'énergie d'activation du phosphore dans le germanium est estimée à 2,93 eV et que la profondeur de diffusion diminue en augmentant la pré-concentration de gallium dans le germanium, ce dernière augmente par l'augmentation de la température, la concentration à la surface et le temps de diffusion.

**Mots-clés:** phosphore, diffusion, lacunes doublement chargés négativement, mécanisme lacunaire.