

# الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



## وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

### جامعة قاصدي مرباح - ورقلة

#### قسم الفيزياء

### مذكرة لنيل شهادة ماستر

تخصص: فيزياء المواد

من إحداد الطالب: تجيني فاروق

بعنوان :

دراسة الانتشار الذاتي واللاذاتي للأرسونيك في

الجرمانيوم

إشراف: د. محمد القادر سويقات

لجنة المناقشة:

رئيساً	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ محاضر - أ	سوداني محمد البار
مناقشا	المدرسة العليا للأساتذة ورقلة	أستاذ مساعد أ	سليمانني ادريس
مشرفاً ومقرراً	المدرسة العليا للأساتذة ورقلة	أستاذ محاضر - أ	سويقات محمد القادر
مساعد مشرف	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ محاضر - أ	بن طويبة عمر

الموسم الجامعي: 2021/2020

## الإهداء

افتتح باب هذا الإهداء بيسم الله الرحمن الرحيم....الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على أشرف الأنبياء والمرسلين  
سيدنا محمد وعلى آله وصحبه ومن تبعهم بإحسان إلى يوم الدين وبعد...

أهدي هذا العمل الكبير إلى من وضع المولى - سبحانه وتعالى - الجنة تحت قدميها، ووقّرها في كتابه العزيز " أمي الحبيبة "  
، حفظها الله .

وإلى من كان له الفضل الكبير في بلوغي هذا التعليم فقد وضعني على الطريق الصحيح " والدي الحبيب "، أطل الله في عمره.

إلى من أظهروا لي ما هو أحلى من الحياة إخوتي وأخواتي الأعزاء فقد كانوا ملجئي وملاذي في كل الصعاب إلى من تذوقت  
معهم أحلى اللحظات .

وأتقرب بإهدائي إلى أستاذي الفاضل " **سويقات عبد القادر** " فقد كان له الفضل في هذا العمل القيم وإلى جميع أساتذتي  
الكرام ممن لم يتوانوا في مد يد العون لي .

إلى كل من نسيه القلم وحفظه القلب.

أهدي لكم هذا العمل المتواضع...ونسأل الله أن يجعله نبراساً لكل طالب علم.

**\*فاروق تجيني\***

# شكر وتقدير

الفضل والمنة لك ربنا وفقطنا لإتمام هذا العمل فنحمدك حمدا لا يحصى ونثني على كمال ذاتك وعظيم صفاتك ما يليق بمقام سلطانك فلك الحمد حتى ترضى ولك الحمد إذا رضيت ولك الحمد بعد الرضا.

يسرنا بعد انتهاءنا من هذا العمل المتواضع ، أن نتقدم بجزيل شكرنا وعظيم امتناننا إلى أستاذنا الفاضل الدكتور **عبد القادر سويقات**، لتفضله بالإشراف على هذا البحث ، وعلى سعة صدره وسمو أخلاقه وعلمه ومعرفته الواسعة بمجال هذا البحث ، فهو لم ييخل علينا بكل ما أوتي من علم، وكان حريصا على تقدم هذا البحث بصورة جيدة، له منا خالص التقدير والدعاء .

جعل الله ذلك في ميزان حسناته إن شاء الله

إلى الأساتذة أعضاء لجنة المناقشة المتكونة من: **رشيد غرياني، عمر بن طويلة وادريس سليمان** ، الذين تشرفنا بقراءتهم للبحث وتقييمهم له و نعتز بملاحظاتهم وتصويباتهم.

في هذا المقام لا يمكن أن ننسى أساتذة قسم الفيزياء، فلهم جزيل الشكر على كل ما بذلوه من جهود خلال مشوارنا الجامعي، والشكر موصول أيضا إلى القائمين على إدارة جامعة قاصدي مرياح بورقلة، فهي التي أتاحت لنا هذه الفرصة .

كما نشكر القائمين على المكتبة المركزية بالجامعة المركزية قاصدي مرياح القطب المركزي على حسن استقبالهم لنا وصيرهم معنا.

كما لن ننسى شكر كل من قدم لنا يد العون والمساعدة واستقبلنا بصدر رحب، كل من دعمنا و دعا لنا.

# الفهرس

الصفحة	العنوان
I	الإهداء.....
II	الشكر والتقدير .....
III	الفهرس.....
VI	قائمة الجداول.....
VII	قائمة الأشكال .....
IX	قائمة الرموز.....
1	المقدمة.....
<b>الفصل الأول: أنصاف النواقل ومميزاتها</b>	
4	تمهيد.....
4	1.1 العوازل ، أنصاف النواقل و النواقل .....
4	1.1.1 العوازل.....
5	2.1.1 النواقل .....
5	3.1.1 أنصاف النواقل .....
7	2.1 البنية البلورية لأنصاف النواقل .....
7	1.2.1 أنصاف نواقل بلورية .....
7	1.2.2.1 أنصاف نواقل أحادية التبلور .....
7	2.2.2.1 أنصاف نواقل متعددة التبلور .....
8	2.2.1 أنصاف نواقل عشوائية .....
8	3.1 أنواع أنصاف النواقل .....
8	1.3.1 أنصاف النواقل الأصلية (الذاتية) .....
9	2.3.1 أنصاف النواقل المطعمة (اللاذاتية) .....
10	1.2.3.1 نصف الناقل من النوع n .....

12	..... 2.2.3.1 نصف الناقل من النوع p	
13	..... طرق التطعيم	4.1
13	..... طريقة الإنتشار	1.4.1
15	..... طريقة الغرس الأيوني	2.4.1
16	..... منابع الشوائب المطعمة	5.1
17	..... مراجع الفصل الأول	
<b>الفصل الثاني: الجيرمانيوم</b>		
20	..... تمهيد	
20	..... اكتشاف الجيرمانيوم	1.2
21	..... تواجده في الطبيعة	2.2
22	..... معادن الجيرمانيوم	3.2
23	..... تنقية الجيرمانيوم	4.2
23	..... طريقة Czochralski	1.4.2
24	..... طريقة الصهر النطاقي Float zone	2.4.2
25	..... البنية البلورية	5.2
25	..... التكوين البلوري	1.5.2
27	..... الفاصل الطاقوي للجيرمانيوم	6.2
27	..... تركيز حاملات الشحنة الذاتية	7.2
29	..... العيوب النقطية للجيرمانيوم	8.2
30	..... تركيز العيوب في حالة التوازن	1.8.2
30	..... آلي الانتشار المجهرية للأرسونيك في الجيرمانيوم	9.2
31	..... معامل الانتشار الذاتي	10.2
31	..... الدراسة النظرية لمعامل الانتشار	1.10.2
33	..... معامل انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم	11.2
34	..... مراجع الفصل الثاني	

الفصل الثالث: نمذجة ومحاكاة انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم

37	تمهيد
37	1.3 نمذجة انتشار الأرسونيك
39	2.3 القانون الثاني لفيك
40	3.3 محاكات منحنيات الانتشار
42	4.3 نتائج ومناقشة
42	1.4.3 محاكات المنحنيات التجريبية ومناقشتها
42	2.4.3 عامل التناسب التربيعي
44	3.4.3 حاملات الشحنة الذاتية
44	4.4.3 معامل الانتشار الذاتي
47	الخاتمة
48	الملخص

# فهرس الجداول

الرقم	محتوى الجداول	الصفحة
<b>الفصل الأول</b>		
1	قيم طاقة التأين مقدرة ب eV لبعض المطعمات المانحة.....	11
2	قيم طاقة التأين مقدرة ب eV لبعض الشوائب الآخذة.....	12
3	منابع المطعمات.....	16
<b>الفصل الثاني</b>		
4	الخواص الفيزيائية للجيرمانيوم.....	22
5	يوضح بعض خامات الجيرمانيوم.....	22
6	قيم الحد الأنطروي ل As وطاقة التنشيط في الجيرمانيوم	33
<b>الفصل الثالث</b>		
7	قيم التركيز الابتدائي على السطح ، معامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم المستعملة في المحاكاة	43
8	قيم معامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم	45

# قائمة الأشكال

## صفحة الأشكال

الرقم	محتوى الشكل	الصفحة
<b>الفصل الأول</b>		
1	يوضح مستويات الطاقة للعازل .....	4
2	يوضح مستويات الطاقة للنواقل.....	5
3	يوضح مستويات الطاقة لشبه الناقل.....	6
4	يوضح مخططات الطاقة للمواد المختلفة .....	6
5	تركيب المواد حسب ترتيب ذراتها .....	8
6	يوضح الرابطة التساهمية لذرتي السليكون والجيرمانيوم .....	9
7	يوضح التطعيم من النوع السالب وتحرر الالكترون.....	10
8	يوضح مستوى المانحات المشغول بالالكترونات وانتقال هذه الالكترونات إلى عصابة النقل بعد اثارها.....	11
9	يوضح التطعيم من النوع الموجب وتحرر الثقب .....	12
10	يوضح المسبقيات الطاقوية للآخذات داخل العصابة الممنوعة.....	13
11	منحنيات الانتشار خلال مرحلة التموضع.....	14
12	منحنيات الانتشار الذاتي لمرحلة التوزع.....	14
13	مخطط يبرز آلية الغرس الأيوني.....	16
<b>الفصل الثاني</b>		
14	أول الترانزستور صنع في مختبرات بيل في عام 1948.....	20
15	يوضح موقع الجيرمانيوم في الجدول الدوري.....	21
16	يوضح معدن رينيريت renierite.....	23
17	يوضح طريقة (Czochralski).....	24
18	يوضح طريقة الصهر النطاقي.....	24



25	جيرمانيوم أحادي البلورة .....	19
25	يوضح ذرة الجيرمانيوم .....	20
26	يوضح الذرات بداخل البلورة .....	21
26	رسم تخطيطي يوضح البنية البلورية للجيرمانيوم .....	22
27	مقارنة بين تغيرات الفاصل الطاقي للجيرمانيوم والسيليسيوم بدلالة درجة الحرارة.....	23
29	يوضح تواجد الفجوة داخل الشبكة البلورية.....	24
29	يوضح تواجد البنية الذاتية داخل الشبكة البلورية.....	25
30	مخطط يبرز الآلية الفجوية.....	26
31	الحاجز الكمومي أثناء الانتقال من موضع الى آخر.....	27
33	يمثل تغيرات معامل انتشار As في الجيرمانيوم حسب المراجع المذكورة.....	28

### الفصل الثالث

40	يوضح تجزئة البعد وزمن الانتشار.....	29
42	المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة ( الخطوط المستمرة ) والمنحنيات التحريبية [1] لانتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم.....	30
43	تغيرات عامل التناسب التريبي مع مقلوب درجة الحرارة.....	31
44	تغيرات تركيز حاملات الشحنة الذاتية ni بدلالة مقلوب درجات الحرارة.....	32
45	تغيرات معامل الانتشار الذاتي بدلالة مقلوب درجات الحرارة.....	33

# 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	$cm^{-3}$
$T$	درجة الحرارة	K
$K_B$	ثابت بولتزمان	$eV.K^{-1}$
$C$	تركيز الشائبة المطعمة	$atom.cm^{-3}$

## مقدمة عامة:

في السنوات الأخيرة، عرف مجال صناعة المركبات الالكترونية تسارعا كبيرا و هو ما يؤكد التزايد الأسي حسب قانون مور Moore's law [3،2،1] لعدد الترانزستورات السيليكونية المستعملة في الرقاقات الالكترونية. تطوير هذه الرقاقات أصبح مرهونا بزيادة فعاليتها وانقاص تكلفتها، وهو ما يقتضي استمرار تحجيم المركبات الالكترونية والالكترونية الضوئية المكونة لها الى بضعة نانوميترات مع ضمان تحسين أدائها.

في الوقت الراهن و منذ 1960 أغلبية هذه المركبات صنعت من السيليسيوم ويرجع ذلك لقلة تكلفته مقارنة بأنصاف النواقل الأخرى. لكن مواصلة مواكبة لسيرورة التطور التكنولوجي في مجالي الاعلام والاتصال باتت تواجه صعوبة متزايدة مع كل جيل من التكنولوجيا، فأى تحجيم لهذه المركبات السيليكونية يجعل التيارات الضائعة من السطح البيني لأكسيده جد معتبرة، ولتخطي هذا الاشكال ومواصلة سيرورة التطور لهذه المكونات، صار لزاما تعويض أكسيد السيليسيوم  $Si_2O_4$  بمواد تمتلك ثابت عزل أكبر والتي تدعى بـ (high-K) مثل  $HFO_2$  وهو ما يفقد السيليسيوم أهميته مقارنة بأنصاف النواقل الأخرى التي تمتلك خصائص ممتازة مثل حركية حاملات الشحنة المرتفعة، قصر الفاصل الطاقوي [5،4].

مؤخرا أبحاث عدة عمدت الى ادخال مواد وبنى جديدة تكون بديلة للسيليسيوم قصد مواكبة هذا التطور. حركية حاملات الشحنة المرتفعة وقصر الفاصل الطاقوي لدى الجيرمانيوم، جذدت الاهتمام بهذا النصف ناقل باعتباره مرشحا واعدا لتعويض السيليسيوم من أجل مواصلة تطوير هذه المكونات، [6 - 11]. في التطبيقات الالكترونية الضوئية الجيرمانيوم يتميز بصغر معامل الامتصاص الأمر الذي يجعل دجه محبذا في المكونات الالكترونية الطوئية المستعملة في الاتصالات في مجال الطول الموجي المحصور بين  $1.3-1.55\mu m$  [10]. هذا الاهتمام بالجيرمانيوم حفز على دراسة انتشار المطعومات بنوعيهما السالب والموجب في هذا النصف ناقل باعتباره مفتاحا لتحقيق دارات نانومترية مطورة وجد فعالة.

في هذه المذكرة نتناول دراسة انتشار الأرسونيك (الزرنخ) في الجيرمانيوم، وذلك من خلال نمذجة انتشاره بالآلية الفجوية، آخذين بعين الاعتبار مساهمة الفجوات ثنائية الشحنة السالبة، ومحاكاة منحنيات الانتشار التحريبية له في الجيرمانيوم ببرنامح بلغة الفورترون. أتمنا ذلك وفق خطة بحث تضمنت مقدمة و ثلاثة فصول مع خاتمة للدراسة.

❖ الفصل الأول : تطرقنا فيه إلى أنصاف النواقل ومميزاتها، بداية بعموميات حول تصنيفات المواد: عازلة، ناقلة ونصف ناقلة، وتطرقنا أيضا إلى أنصاف النواقل الأصلية والمطعمة بنوعيهما السالب n والموجب p.

❖ الفصل الثاني : تناولنا فيه عنصر الجيرمانيوم وخواصه، حيث تطرقنا إلى اكتشافه وتواجده في الطبيعة وطرق تنقيته، كما تطرقنا إلى البنية البلورية له، الفاصل الطاقوي وتركيز حاملات الشحنة الذاتية.

- ❖ الفصل الثالث : تضمن نمذجة انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم و نتائج محاكاة منحنيات انتشاره التجريبية في الجيرمانيوم مع مناقشتها.
- ❖ الخاتمة لخصنا فيها أهم النتائج المتحصل عليها.

## مراجع المقدمة:

- [1] G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits", *Electronics*, **38**(8),114 (1965).
- [2] G. Dan Hutcheson and Jerry D. Hutcheson, " Technology and Economics in the Semiconductor Industry", *Scientific American The Solid-State Century*,**8**(1) 66(1997).
- [3] David C. Brock, " Understanding Moore's Law: Four Decades of Innovation", *J. Chem. Educ* , **84** (8) 1278(2007).
- [4] C. O. Chui, S. Ramanathan,B.B. Triplett, P. C. McIntyre, and K.C. Saraswat, "Germanium MOS Capacitors Incorporating Ultrathin High-k Gate Dielectric", *IEEE Electron Device Lett.* **23**, 473 (2002).
- [5] M.J. Puska: « Electronic structures of point defects in III-V compound semiconductors», *J. Phys: Condens. Matter* **1**, pp 7347-7366 (1989).
- [6] H. Iwai, "Roadmap for 22 nm and beyond", *Microelectronic Engineering* **86**, 1520 (2009).
- [7] The International Technology Roadmap for Semiconductors, Emerging Research Devices Summary, 2013 EDITION.
- [8] H. Kim, C. O. Chui, K. Saraswat, P. C. McIntyre, "Local epitaxial growth of ZrO<sub>2</sub> on Ge (100) substrates by atomic layer epitaxy", *Appl. Phys. Lett.* **83**,2647 (2003).
- [9] H. Shang, H. Okorn-Schmidt, J. Ott, P. Kozlowski, S. Steen, E. C. Jones,H. S. Wong, and W. Hanesch, " Electrical characterization of germanium p-channel MOSFETs", *IEEE Electron Device Lett.* **24**, 242 (2003).
- [10] E.Simoen and C. Claeys, " Germanium Based Techn-ologies:From Materials to Devices", edited bC. Claeys and E. Simon (Elsevier,Amsterdam, 2007).
- [11] K.C. Saraswat, D. Kim, T. Krishnamohan, D. Kuzum,A.K. Okyay, A.Pethe, H. Yu, " Germanium for High Performance MOSFETs and Optical Interconnects", *ECS Transactions*, **16** (10) 3-12 (2008).

الفصل الأول:

أنصاف النواقل ومميزاتها

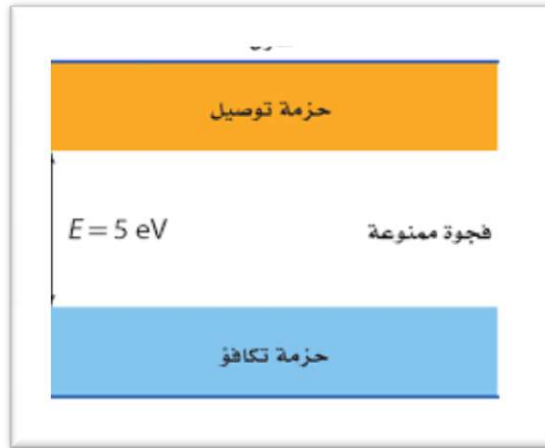
## تمهيد

توجد المادة في أربعة حالات هي : الحالة الصلبة والسائلة والغازية بالإضافة إلى البلازما، إذ يختلف التركيب البنائي للمادة من حالة إلى أخرى حسب قوى الربط المسيطرة على المادة. تكتسي أنصاف النواقل أهمية بالغة لما تلعبه من دور مهم في تكنولوجيا الصناعة الالكترونية والكهروضوئية. نسلط الضوء في هذا الفصل على هذه المواد، أنواعها وطرق تطعيمها.

## 1.1- العوازل ، أنصاف النواقل والنواقل

### 1.1.1- العوازل

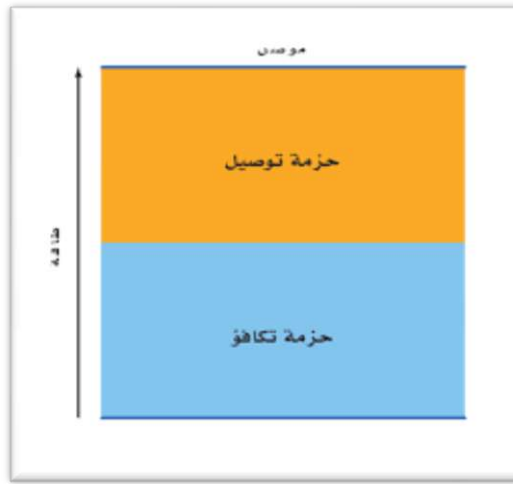
هي مواد مقاومتها النوعية لممر التيار الكهربائي عالية جدا وتكون عادة في المدى من  $10^{14}$  إلى  $10^{22} \Omega.Cm$  ، ولا تسمح بممر التيار الكهربائي لعدم وجود وفرة من الإلكترونات الحرة ، وفي هذه المواد يكون اتساع النطاق المحظور كبيرا ، أي أن الفرق في الطاقة بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل كبيرا ويساوي تقريبا ( 3 - 8 ) إلكترون فولط (e.v) بحيث إذا استخدمنا مجال كهربائي لمنح أي إلكترون طاقة لتخطي النطاق المحظور ستكون الطاقة كبيرة جدا وتبلغ شدة المجال الكهربائي حوالي (  $6 \times 10^8 \text{ v/cm}$  ) تقريبا، لذلك من المستحيل منح أي إلكترون هذه الطاقة وبالتالي لا يوجد أي إلكترون في نطاق التوصيل ، مثل : الخشب ، الكوارتز ، البلاستيك ، المطاط ، الزجاج ... [1,2,4].



الشكل (1): يوضح مستويات الطاقة للعازل

## 2.1.1- النواقل (المواد الموصلة)

هي مواد مقاومتها النوعية للتيار صغيرة جدا في حدود  $10^{-6} \Omega.Cm$  وتسمح بمرور التيار الكهربائي من خلالها لاحتوائها وفرة من الإلكترونات الحرة . و تتميز هذه بعدم وجود نطاق محظور بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل ، أي يتفاعل كل من نطاقي التكافؤ والتوصيل فيما بينهما ، وإلكترونات التكافؤ تكون هي نفسها إلكترونات التوصيل وعند تواجد مجال كهربائي ما تكتسب الإلكترونات طاقة إضافية مما يؤدي إلى سهولة الانتقال بين مستويات الطاقة المختلفة، مثل الحديد ، النحاس ، الألمنيوم [1،2،4]....

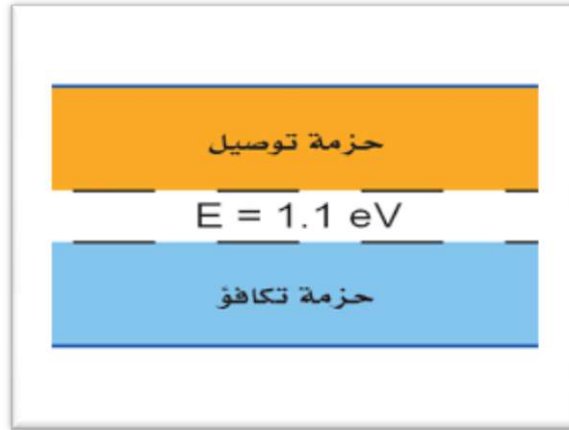


الشكل(2) : يوضح مستويات الطاقة للنواقل

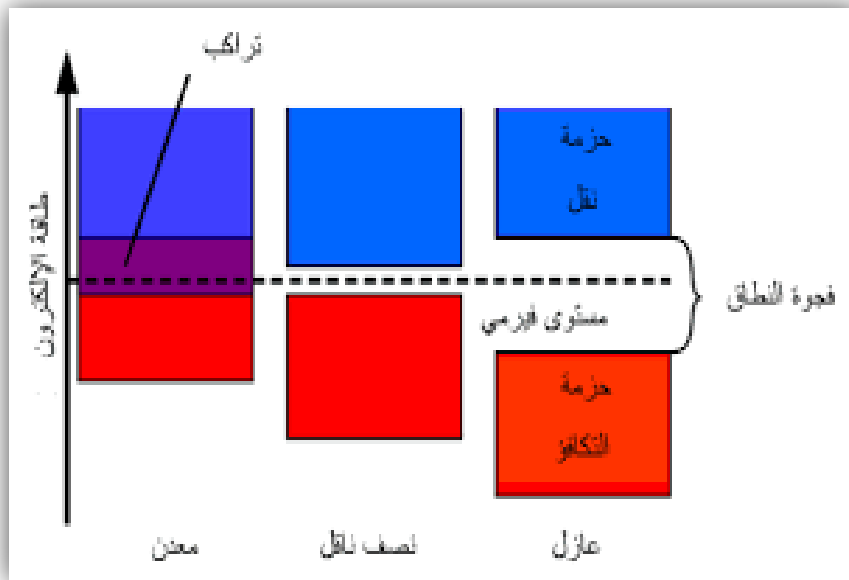
## 3.1.1- أنصاف النواقل (المواد شبه الموصلة) :

هي عبارة عن موصلات إلكترونية ذات مقاومة نوعية كهربائية أكبر من مقاومة الموصلات ولكنها أقل من مقاومة المواد العازلة . ولها قدرة على توصيل التيار الكهربائي ولكن ليست بجودة توصيل الموصلات . ويكون عرض النطاق المحظور صغير جدا تقريبا (1 e.v) أي لا يوجد تداخل بين الحزمة الناقلة والتكافؤية ولا يوجد فراغ كبير بينهما . وعند درجة حرارة الصفر المطلق ( $0^0K$ ) تكون جميع الإلكترونات في نطاق التكافؤ ولا يوجد أي منها في نطاق التوصيل . و بالتالي هذه المواد تكون عازلا مثاليا عند ( $0^0K = -273^0C$ ) . أما عند زيادة درجة الحرارة فإن الإلكترونات سوف تقفز من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل وبذلك تسلك هذه المادة سلوك المواد الموصلة . مثل : السليكون (Si) والجرمانيوم (Ge) ... [5-3،1]





الشكل (3): يوضح مستويات الطاقة لشبه الناقل



الشكل (4): يوضح مخططات الطاقة للمواد المختلفة

في الناقل يتداخل شريطا التكافؤ والتوصيل، في نصف الناقل فجوة الطاقة تكون صغيرة ، أما في العازل فجوة الطاقة تكون كبيرة ولا تستطيع الكترولونات التوصيل اجتيازها.

ملاحظة :

لا توجد حدود فاصلة بين الموصل والعازل فقد يتحول العازل إلى موصل في ظروف أخرى مثل وجود الرطوبة أو التغير الكبير في درجة الحرارة وغيرها ، فالهواء الجاف مثلا عازل جيد للكهربائية أما الهواء الرطب فهو موصل جيد للكهربائية [7].

## 2.1- البنية البلورية لأنصاف النواقل:

تصنف المواد النصف الناقلة من حيث بنيتها البلورية إلى قسمين رئيسيين ، حيث لكل قسم خصائص يتفرد بها عن غيره و هي كالآتي :

### 1.2.1- أنصاف نواقل بلورية

يكون توزع الذرات فيها بشكل متكرر في الفضاء (الأبعاد الثلاثة) ، وتقسم بدورها إلى نوعين هما :

#### 1.1.2.1- أنصاف نواقل أحادية التبلور

تمتاز هذه المواد بأن ذراتها أو جزيئاتها لها ترتيب هندسي دوري وذات درجة عالية من الانتظام ، حيث تعيد نفسها دوريا وبصورة متكررة في الأبعاد الثلاثة ، وبالتالي فهي تمتلك

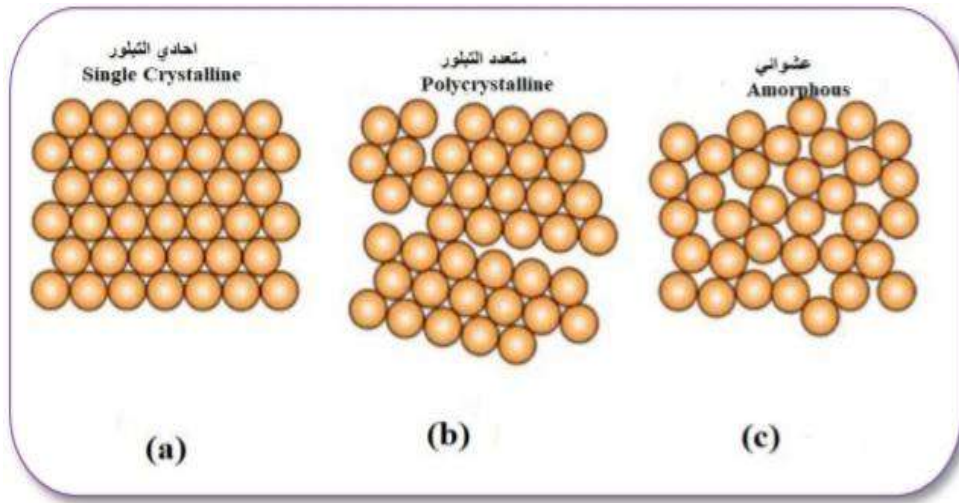
نوعا من التماثل ، ويدعى ترتيب الذرات هذا في البلورة لترتيب المدى الطويل (LRO) . ويشار إلى الترتيب الدوري للذرات في البلورة بالشبكة التي تتشكل من وحدات مكررة على امتداد البلورة ، وتسمى كل وحدة من هذه الوحدات بوحدة الخلية وهي مبينة في الشكل ( a-5 ) .

#### 2.1.2.1- أنصاف نواقل متعددة التبلور

هي عبارة عن مواد تتكون من العديد من البلورات الأحادية الصغيرة وتعرف بالحبيبات التي تمتلك كل منها على حدى ترتيب المدى الطويل ، بينما تمتلك الحبيبات البلورية مجتمعة ترتيب المدى القصير (SRO) . تعرف مناطق التقاء الحبيبات التي عندها ينقطع الترتيب الدوري لكل حبيبة بالحدود الحبيبية ، كما تمتاز هذه المواد بأنها متباينة الخواص الإتجاهية (Anisotropic) أي أن صفاتها المميزة تعتمد على اتجاه محاور البلورة . وهي موضحة في الشكل ( b-5 ) .

### 2.2.1- أنصاف نواقل عشوائية

حيث أن الترتيب الذري في أي جزء من المادة لا يشبه الذي يليه ، وبالتالي تكون الحالة غير مستقرة ترموديناميكيا، أي تتحول إلى مادة متبلورة عند زوال العوامل التي تجعل تركيبها عشوائيا ، كما تمتاز هذه المواد بأنها متماثلة الخواص الإتجاهية (Isotropic) وبالتالي لا يظهر للإتجاه أي تأثير على خواصها .وهي ممثلة في الشكل (5-c) [9].



الشكل(5) : تركيب المواد حسب ترتيب ذراتها

### 3.1- أنواع أنصاف النواقل

تصنف أشباه الموصلات إلى مجموعتين وهي أشباه الموصلات النقية (الذاتية) وأشباه الموصلات غير النقية ( اللاذاتية ).

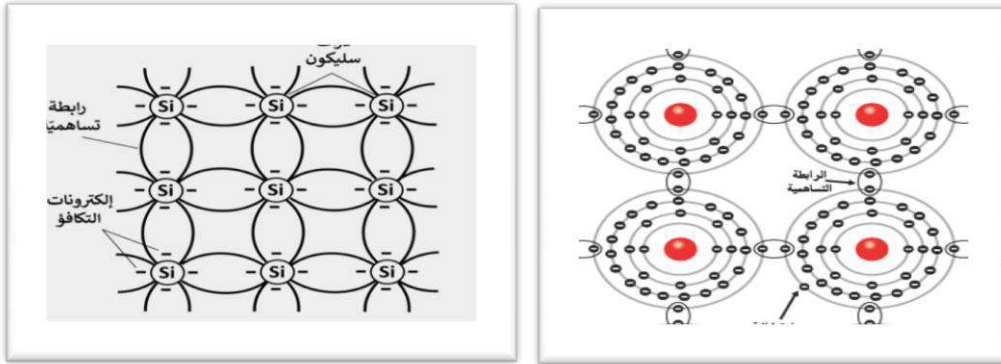
#### 1.3.1- أنصاف النواقل الأصلية (الذاتية)

نصف الناقل الأصلي أو الذاتي هو نصف ناقل نقي وغير مطعم بشوائب غريبة وخال من العيوب . حيث يتم خلق ناقلات الشحنة فيها عن طريق التهييج الحراري أو البصري للإلكترونات من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل . نظرا لأنه في كل توصيل إلكترون سوف يترك ثقب في حزمة التكافؤ ، لذلك فإن عدد الثقوب يساوي دائما عدد إلكترونات التوصيل في أشباه الموصلات النقية.

في درجة الصفر المطلق لا يوجد في نصف الناقل الأصيل حاملات شحنة . لكن عندما ترتفع درجة الحرارة ، تتولد أزواج من الإلكترونات والثقوب نتيجة إثارة إلكترونات عصابة التكافؤ حراريا عبر فرجة

الطاقة إلى عصابة النقل . هذه الأزواج من الإلكترونات و الثقوب هي حاملات الشحنة الوحيدة لنصف الناقل الأصيل. من أشهر أشباه الموصلات السليكون (Si) والجرمانيوم (Ge) .

يوجد أربع إلكترونات تكافؤ في المدار الخارجي لذرتي السيليكون والجرمانيوم وحتى يكتمل نطاق التكافؤ لابد من وجود ثمانية إلكترونات في المدار الخارجي وهذا يتحقق من خلال تشارك كل ذرة من السيليكون أو الجرمانيوم مع أربع ذرات مجاورة وتسمى هذه الرابطة بين الذرات بالرابطة التساهمية ( Covalent Bond ) كما هو مبين في الشكل ( 6 ) ، وتكون ذرات مادة السليكون أو الجرمانيوم مرتبة بشكل هندسي دقيق ومنتظم لتكوّن النسق البلوري ( Crystal ) لذلك يقال عن هذه المواد أنها ذات تركيب بلوري [ 3 - 1 ] .



الشكل(6): يوضح الرابطة التساهمية لذرتي السليكون والجرمانيوم

### 2.3.1- أنصاف النواقل المطعمة (اللاذاتية)

الهدف من تطعيم أنصاف النواقل هو الحصول على خواص كهربائية وضوئية مميزة للنصف الناقل . تتم هذه العملية بإضافة كمية قليلة ومتحكم بها من الشوائب المطعمة المناسبة للنصف الناقل، حيث تكسبه خواص فيزيائية تختلف عما هي عليه في حالته النقية. فمثلا عند تطعيم السليسيوم النقي بالبور B بنسبة ذرة الى  $10^5$  ذرة سيليسيوم تتضاعف الناقلية الكهربائية ب  $10^3$  مرة. ينتج عن عملية التطعيم ازاحة التوازن الكائن بين تركيزي حاملات الشحنة الموجبة والسالبة بعد أن كان تركيزيهما متساوي

في الحالة النقية . تجعل هذه الازاحة تركيز الالكترونات في عصابة النقل CB أكبر من تركيز الثقوب في عصابة التكافؤ VB أو تركيز الالكترونات في عصابة النقل CB أقل من تركيز الثقوب في عصابة التكافؤ VB ، وهذا حسب نوع التطعيم .

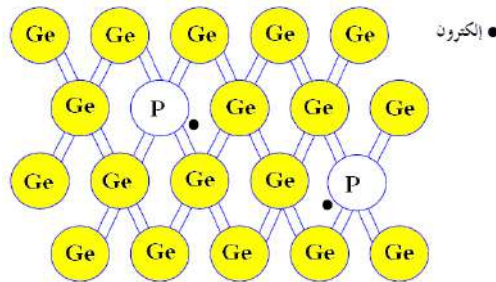
الشوائب المستخدمة هي ذرات عناصر خماسية التكافؤ أو ثلاثية التكافؤ بمعنى وجود خمس أو ثلاث إلكترونات تكافؤ في مدارها الأخير . إن نسبة الشوائب المستخدمة تكون ضئيلة جدا بالنسبة لذرات المادة نصف الناقلة مما يجعل الخصائص الفيزيائية والكيميائية لا تتغير ولكن الخصائص الكهربائية تتغير تغيرا كبيرا .

تعتبر هذه التقنية -التطعيم- الأكثر إنتشارا لتغيير الناقلية النوعية لأنصاف النواقل . وهكذا ، فنصف الناقل اللاذاتي أو المولد هو نصف ناقل مطعم بشائبة معينة قادرة على تعديل عميق في خصائصه الكهربائية ، مما يجعله مناسباً للتطبيقات الإلكترونية ( الديودات والترانزيستورات ، وما إلى ذلك ) أو التطبيقات الإلكترونية (مصادر للضوء ومكاشيف ) . وبالتطعيم يمكن تغيير نوع حاملات الشحنة المسيطرة في عملية النقل الكهربائي ، بحيث تكون إلكترونات أو ثقوبا .

وبناء على نوع الشوائب المضافة لشبه الموصل يمكن تصنيف شبه الموصل غير النقي إلى : نوع سالب n تكثر فيه الإلكترونات ونوع p موجب تغلب عليه الثقوب [2,4,6] .

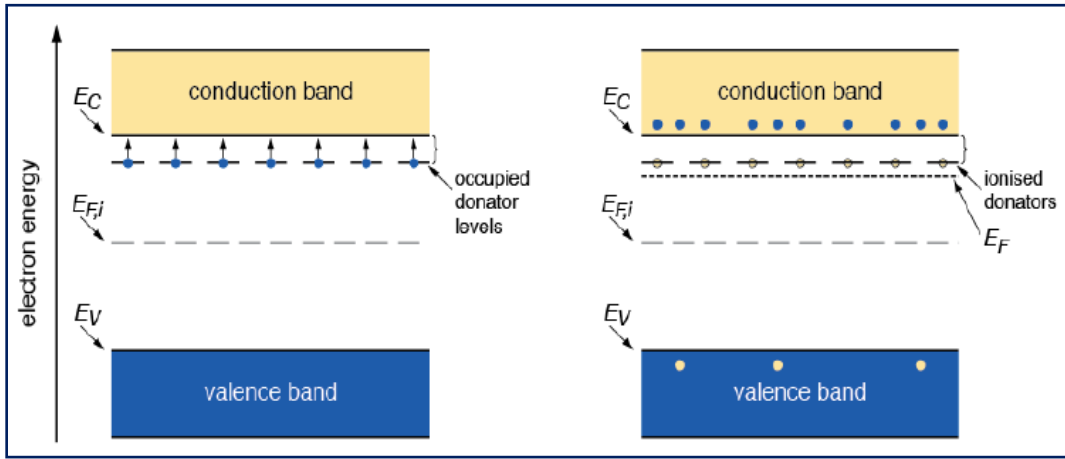
### 1.2.3.1 - نصف الناقل من النوع n

لكون إلكترونات التكافؤ لكل ذرة من ذرات الجيرمانيوم في الحالة الصلبة وعددها اربعة مرتبطة مع البلورة ضمن روابط التكافؤ، تحتاج هذه الالكترونات إلى طاقة تعادل الفاصل الطاقي  $E_g$  في الظروف الاعتيادية لكي تساهم في التوصيل . لا تكفي درجة حرارة المحيط لتوفير هذه الطاقة . عند إضافة مطعمه خماسية التكافؤ، من العناصر الموجودة في العمود الخامس من الجدول الدوري، والتي تسمى بالمطعمات المانحة مثل الأرسنيك As والفسفور P والانتيموان Sb، إلى الشبكة البلورية للجيرمانيوم، سترتبط مع الشبكة بأربعة روابط تكافؤية ويبقى ارتبط الالكترون الخامس للمطعمه ضعيف بذوته كما في الشكل 7 أدناه.



الشكل (7): يوضح التطعيم من النوع السالب وتحرر الالكترون

ونتيجة لهذا الارتباط الضعيف فإن الطاقة اللازمة لفصله عن ذرته (طاقة التأين) ونقله حرا الى عصابة النقل تكون صغيرة أمام  $gE$  (في حالة الجيرمانيوم المطعم بللفوسفور As طاقة التأين:  $0.0127 \text{ eV}$  و  $gE = 0.66 \text{ eV}$ ). في هذه الحالة يكون مستوى طاقة المطعم المانحة As موجود في الفاصل الطاقوي قريب جدا من قعر عصابة النقل . فتطعيم نصف الناقل بمطعمات مانحة ينتج عنه حالات مشغولة بالالكترونات داخل العصابة الممنوعة . المستوى الطاقوي لهذه المانحات (Donator Levels) يكون قريبا من مستوى عصابة النقل، حيث تنتقل له بمجرد إثارتها بطاقة تعادل طاقة التأين كما يبينه الشكل 8.



الشكل (8): يوضح مستوى المانحات المشغول بالالكترونات وانتقال هذه الالكترونات إلى عصابة النقل بعد اثارها

عند 0K تكون كل الذرات غير متأينة أي أن مستويات المطعم المانحة داخل العصابة الممنوعة مشغولة بالالكترونات. عند رفع درجة الحرارة تتأين ذرات الشائبة أي ان الكترونها الخامس سينفصل عنها ويصبح حر في CB. والطاقة التأين لا تكفي لاثارة الالكترونات الذاتية من VB الى CB، وبالتالي يكون تركيز الالكترونات الناتجة عن المانحات في CB اكبر بكثير من الالكترونات الذاتية في هذه الحالة. يبين الجدول (1) طاقة التأين للفسفور والأنتيموان والأرسونيك في الجيرمانيوم.

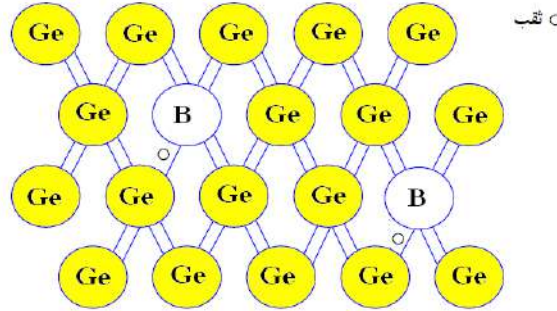
الجدول (1): بين قيم طاقة التأين مقدرة ب eV لبعض المطعمات المانحة

	P	As	Sb
طاقة التأين الجيرمانيوم	0.012	0.0127	0.096

تتواجد الالكترونات الناتجة عن المطعمات المانحة في CB بدون ثقب مقابل لها في VB ، لذلك يتحدد النقل اساسا في نصف الناقل بالالكترونات. يدعى نصف الناقل المطعم بعناصر العمود الخامس بنصف ناقل من النوع N [2,4,6,11,10].

### 2.2.3.1 - نصف الناقل من النوع p

بنفس الآلية تفهم عملية تطعيم الجرمانيوم النقي بشوائب ثلاثية التكافؤ من عناصر العمود الثالث ، والتي تسمى بالملحمة الآخذة مثل البور B والألمنيوم Al والغالسيوم Ga والاندسيوم In. والملحمة الآخذة أثناء تواجدها في محل ذرة الجيرمانيوم في شبكته البلورية ينقصها إلكترون واحد لكي يصبح لديها أربعة إلكترونات خارجية تشكل بهم أربعة روابط تكافؤية مع الجوار الأقرب الأربعة . يتولد عن هذا النقصان ثقب في الرابطة التكافؤية ارتبطه بالملحمة يكون ضعيف كما في الشكل (9). ونتيجة لهذا الارتباط الضعيف فإن طاقة فصله عن الم ملحمة الآخذة (طاقة التأين) ونقله حرا الى عصابة التكافؤ تكون صغيرة أمام gE (في حالة الجيرمانيوم المطعم بالبور B طاقة التأين: 0.0104 eV). في هذه الحالة يكون مستوى طاقة الملحمة الآخذة B موجود في الفاصل الطاقوي قريب جدا من قمة عصابة التكافؤ.



الشكل (9): يوضح التطعيم من النوع الموجب وتحرر الثقب

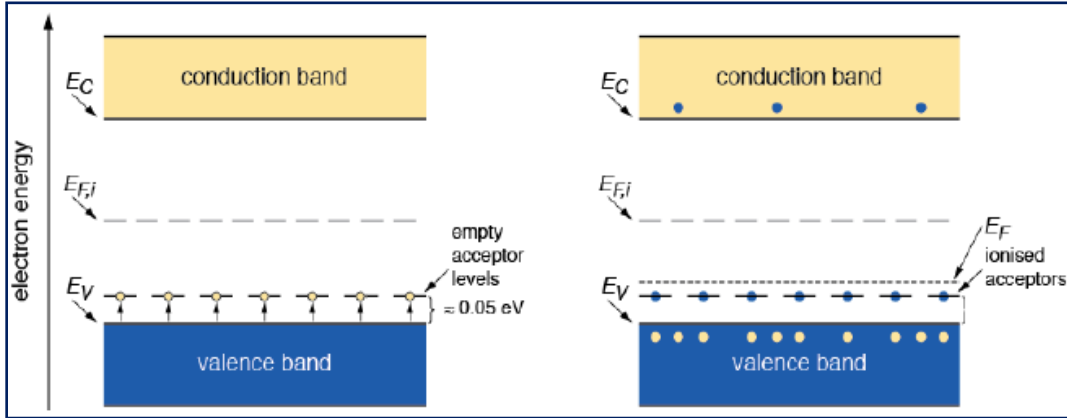
الجدول أدناه يبرز طاقة التأين لبعض الشوائب الآخذة في الجيرمانيوم.

الجدول (2): بين قيم طاقة التأين مقدرة ب eV لبعض الشوائب الآخذة

	B	Ga	In
طاقة التأين في الجيرمانيوم	0.0104	0.0108	0.0112

إن تطعيم نصف الناقل بمطعمات آخذة ينتج عنه حالات ممكنة الانشغال بالالكترونات داخل العصابة الممنوعة ، مستواها الطاقوي يدعى بمستوى الآخذات (Acceptor Levels) ، يكون قريبا من قمة عصابة التكافؤ حيث تنتقل له الالكترونات من عصابة التكافؤ مخلفة ثقوبا في هذه العصابة، بمجرد إثارتها بطاقة تعادل طاقة التأين كما يبينه الشكل 10.

عند 0K تكون كل الذرات غير متأينة أي أن مستويات الم طعمات الآخذة داخل العصابة الممنوعة غير مشغول بالالكترونات. عند رفع درجة الحرارة تتأين ذرات الم طعمة الآخذة أي ينتقل إلكترون من شريط التكافؤ إلى مستوى الآخذات فيتحرر بذلك ثقب ناقل في VB. في هذه الحالة يزداد تركيز الثقوب في VB و يتحدد النقل اساسا في نصف الناقل با لثقوب. يدعى نصف الناقل الم طعم بعنصر العمود الثالث بنصف ناقل من النوع (P) [1,2,6,10,11].



الشكل (10): يوضح المسرقيات الطاقوية للآخذات داخل العصابة الممنوعة

#### 4.1 طرق التطعيم

هناك طريقتان هما الأكثر استعمالا وشيوعا مستخدمتان لتطعيم الجيرمانيوم هما الانتشار الحراري الذي ستقتصر الدراسة عليه والغرس الأيوني.

##### 1.4.1 طريقة الإنتشار

نميز بين مجالين يمكن أن يحدث فيهما الإنتشار هما :

مجال الإنتشار الذاتي : في هذا المجال تكون حاملات الشحنة الذاتية أكبر بكثير من تركيز الشوائب ويكون  $n=n_i$

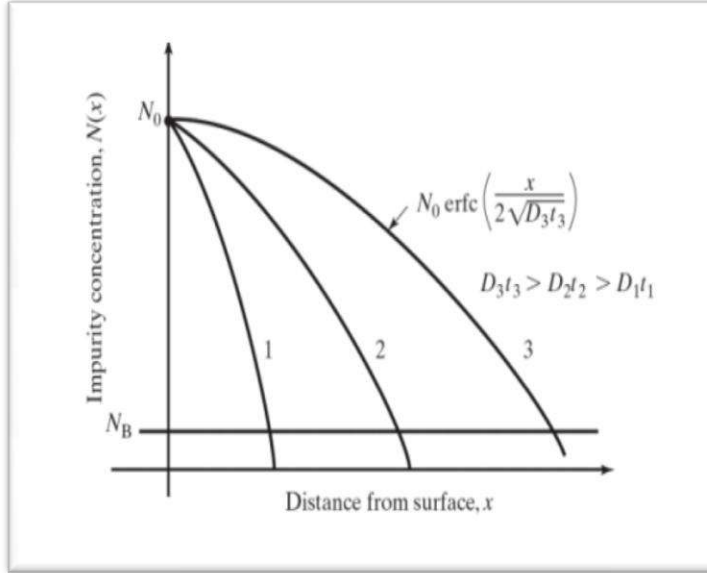
مجال الإنتشار اللاذاتي : في هذا المجال يكون تركيز الشوائب معتبر مقارنة بتركيز الحاملات الذاتية وهذا يحصل عندما تكون العينة مشابهة بقدر كبير [11].

في التطبيق العملي يتم التطعيم وفق هذه الطريقة على مرحلتين :



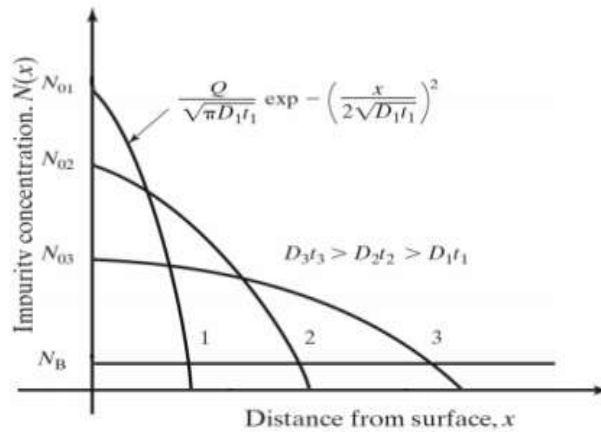
التموضع المسبق : يتم إبقاء صفائح الجيرمانيوم في وسط مشبع بالشوائب المطعمة وبتركيز ثابت لمدة زمنية معينة وتحت درجة حرارة ثابتة . يحدث الإنتشار في هذه الحالة على أعماق صغيرة مقارنة بسمك صفائح المادة النصف ناقلة [11].

الشكل (11) يبين منحنيات إنتشار في الشروط الذاتية في حالة التوضع المسبق :



الشكل (11): منحنيات الانتشار خلال مرحلة التوضع.

مرحلة التوزع : يقطع منبع الإشابة عن صفائح الجيرمانيوم ويتم إخضاعها إلى درجة حرارة عالية لكي تصل الشوائب المطعمة إلى عمق أكبر . تكون منحنيات الإنتشار في الشروط الذاتية في حالة التوزع كما هو مبين في الشكل (12) .



الشكل (12): منحنيات الانتشار الذاتي لمرحلة التوزع

## 2.4.1 طريقة الغرس الأيوني

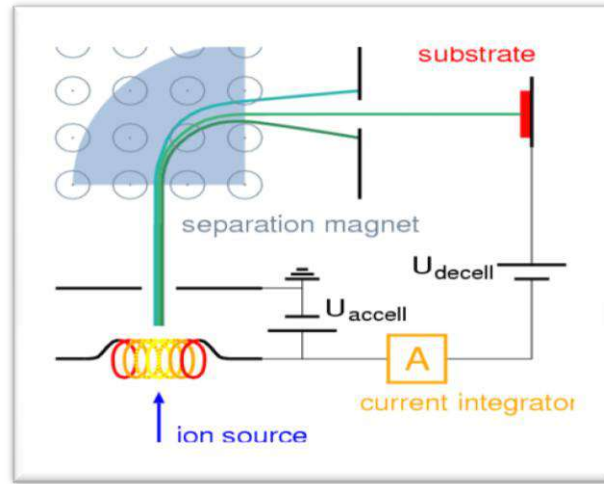
بدأت فكرة الدراسات حول مفعول الزرع الأيوني على سطح صلب منذ 1900 ، ولكنها بدأت في التنفيذ في حدود سنة 1952 وانتشرت في حدود سنة 1962-63 ، وتعددت هذه الدراسة ابتداءً من سنة 1967-68 [10].

هي تقنية مستخدمة في علم المواد من أجل تغيير الخصائص الفيزيائية للأجسام الصلبة. تخص أنصاف النواقل ذات الطبقات الرفيعة جداً لأنها تمكننا من التحكم في المدى الذي تبلغه الشوائب النافذة . طور مبدأ غرس الأيونات كوسيلة من أجل إنتاج وصلات من النوع الموجب والسالب للمكونات الإلكترونية والإلكترونية الضوئية . (صناعة الصمامات الثنائية والثلاثية بخصائص حسنة)

تعتمد هذه الطريقة على إدخال كمية محددة من الشوائب المطعمة عن طريق قذف العينة المراد تطعيمها بحزمة من الأيونات مسرعة وموجهة بواسطة حقل كهرو-مغناطيسي . هذه الأيونات تكون شائبة ، مختارة ، مزودة بطاقة حركية (تتراوح بين بضعة Kev إلى أكثر من 1Mev) من خلال تسريع أيونات المطعمات المراد إضافتها في مجال كهربائي وصدمة على سطح الجسم الصلب . هذه الطاقة تجعل من المطعمات تنفذ داخل بلورة شبه الناقل المراد تشويبه على بعض المسافات (سمك صغير جداً)

تقوم الأيونات الصادمة بنقل الطاقة إلى إلكترونات وأنوية المادة الهدف ، مما يسهم في حدوث تغيير في التركيب البنيوي للمادة الصلبة نتيجة لحدوث سلسلة من التصادمات داخل المادة . الطريقة التي أدخلت بها الأيونات إلى الصلب تلحق ضرراً كبيراً بسطحه وتجعل العديد منها (من الأيونات) يحتل مواضع غير مناسبة بمعنى غير استعاضية وبالتالي سيكون وجودها غير فعال كهربائياً . لذلك فإن عملية الزرع الأيوني تتطلب أن تتلى بمعالجة حرارية حتى تأخذ الذرات المواضع المناسبة وتنقص تلك الإهتزازات وتسمى هذه العملية بالتحمية ، لذا ينبغي تجنب الحرارة المرتفعة التي تؤدي إلى إنتشار الشوائب داخل الحجم أو تفكيك الجسم وتبخير عناصره الذاتية .

يتألف جهاز غرس 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 ، ومن الحجره الهدف ، حيث مكان اصطدام الأيونات بالجسم الصلب الهدف . غالباً 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 مقدار الجرعة المرغوب فيها [10،11].



الشكل (13): مخطط يبرز آلية الغرس الأيوني.

### 5.1 منابع الشوائب المطعمة

يمكن تصنيف منابع الشوائب المطعمة إلى ثلاثة حالات فيزيائية والتي تتمثل في الحالة الصلبة، السائلة أو الغازية لهذه المطعمات ومن خلال الجدول (3) أدناه يمكن التعرف على أهم المركبات التي تحتوي على هذه المطعمات [11].

الجدول (3): يوضح منابع المطعمات.

النوع	العنصر	الصيغة	اسم المركب	الحالة
N N N P P	الأتيمون	$Sb_2O_3$	ثالث أوكسيد الأتيمون	الصلبة
	الأرسونيك	$As_2O_3$	ثالث أوكسيد الأرسونيك	
	الفوسفور	$P_2O_5$	خامس اوكسيد الفوسفور	
	البور	$B_2O_5$	ثالث أوكسيد البور	
	البور	$B_2H_6$	الديبوران	
N N P	الأرسونيك	$AsH_3$	الأرسين	الغازية
	الفوسفور	$PH_3$	الفوسفين	
	البور	$BCl_3$	ثلاثي كلوريد البورون	
N P	الفوسفور	$POCl_3$	أوكسيد كلوريد الفوسفور	السائلة
	البور	$BBr_3$	ثالث بروميد البور	

## مراجع الفصل الأول

- [1] - محمد أسعد البعبع ؛ الفيرا الكسندر وفنا الدويري ؛ صفاء توفيق المقبل ، الإلكترونيات ، الطبعة الأولى 2014 م- 1435 هـ ، مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع .
- [2] - الدكتور محمد قعقع ، الإلكترونيات الأساسية (الإلكترونيات 1) ، جامعة دمشق كلية العلوم .
- [3] - الدكتور مناف عبد حسن ، فيزياء الحالة الصلبة ، الطبعة الأولى 2004 م-1424 هـ ، دار صفاء للنشر والتوزيع - عمان .
- [4] - م. مؤيد فايز القواسمة ، أشباه الموصلات ، الطبعة الأولى 2006 م-1426 م ، 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 ، 2013/2012 م.
- [6] - د. فحري اسماعيل حسن ، الكهرباء وأشباه الموصلات ، جامعة قسنطينة ، الطبعة الثانية 1989 م ، ديوان المطبوعات الجامعية الجزائر.
- [7] - د. وليد القادري ، موسوعة الفيزياء "الكلاسيكية والحديثة" ، الطبعة الثالثة 2009 م ، دار أسامة للنشر والتوزيع الأردن - عمان .
- [8] - مصطفى عباس هادي ؛ محمد حميد مهدي ، دراسة الخصائص الأساسية والبصرية والعيوب البلورية لأشباه الموصلات ، بحث مقدم إلى رئاسة قسم الفيزياء - كلية التربية كجزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في الفيزياء ، جامعة القادسية / كلية التربية ، جمهورية العراق ، 2017 م .
- [9] - وردة بن علي ؛ صبرين بوشول ، مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة ماستر أكاديمي بعنوان تحضير ودراسة الأغشية الرقيقة لكبريتيد الكاديوم (Cds) المرسبة بطريقة الحمام الكيميائي (CBD) ، جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي - كلية العلوم الدقيقة - قسم الفيزياء ، 2018/2017 م .

[10]- هامل عبد الوهاب ، مذكرة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه دولة بعنوان تطوير نموذج السطح المسنن للخلايا الشمسية للحصول على مردود طاقي عالي ، جامعة باجي مختار - عنابة ، 2009 / 2010 م .

[11]- سويقات عبد القادر - أطروحة مقدمة لنيل شهادة الدكتوراه بعنوان دراسة لنصف الناقل الجيرمانيوم المطعم للاستعمال في المكونات الإلكترونية الضوئية ، جامعة قاصدي مرباح - ورقلة، 2015 / 2016 م .

الفصل الثاني:

الجيرمانيوم ومميزاته

## تمهيد

في هذا الفصل سنتطرق الى الجيرمانيوم تواجده في الطبيعة، اكتشافه وطرق تنقيته ، كما سنتناول أيضا خواصه و المتمثلة في البنية البلورية ، الفاصل الطاقوي و تركيز حاملات الشحنة، بالاضافة إلى العيوب النقطية فيه و آلية الانتشار الفجوية للأرسونيك فيه مع التطرق إلى تقييم معامل الانتشار الذاتي من خلال بعض الدراسات.

## 1.2- إكتشاف الجيرمانيوم

في سنة 1864، تصور John Newlands وجود عنصر وسيط بين السيليسيوم والقصدير أثناء انشاء الجدول الدوري الأول للعناصر الكيميائية، وفي سنة 1871، فكر Dmitri Mendeleev في وجود هذا العنصر حيث حدد موقعه وسماه شبيه السيليسيوم الا أن أتى Clemens Winkler الذي استطاع استخلاص العنصر من خام argyrodite وأعطى له اسم الجيرمانيوم في اشارة الى بلاده ألمانيا. بدأ الاستغلال الفعلي للجيرمانيوم في الصناعة مع بداية الحرب العالمية الثانية ، حيث طورت آنذاك صمامات ثنائية منه بغرض استخدامها في الرادارات . جاء بعد ذلك اختراع أول ترانزستور في 1947 في مختبرات Bell وعدسات الأشعة تحت الحمراء في سنة 1949 [1-5].



الشكل (14): أول الترانزستور صنع في مختبرات بيل في عام 1948 [2]

## 2.2- تواجده في الطبيعة

الجيرمانيوم هو عنصر شبه معدني بلون رمادي فاتح وهومن أشباه الموصلات التي لها خواص كهربائية بين تلك المعادن والعوازل يقع أسفل السيليسيوم مباشرة في الجدول الدوري لماندليف (العمود الرابع) ، ينتمي إلى المجموعة 14 IVA في الجدول الدوري (عائلة ميتالويد metalloides الشكل (15) ، يرمز له بالرمز (Ge) ، عدده الذري  $Z = 32$  ، لديه الوزن الذري 72.59. الجيرمانيوم الطبيعي هو مزيج من خمسة نظائرمستقرة بنسب مختلفة والمتمثلة في:  $^{74}\text{Ge}$  (35.94%) ،  $^{72}\text{Ge}$  (27.66%) ،  $^{70}\text{Ge}$  (21.23%) ،  $^{73}\text{Ge}$  (7.73%) و  $^{76}\text{Ge}$  (7.44%). بالإضافة إلى ذلك ، تم تحديد 33 نظيراً مشعاً ، اثنان منها لهما نصف عمر مقاس بالأيام ، والباقي لها نصف عمر يتراوح بين 20 ملي ثانية و 39 ساعة. الجيرمانيوم هو رباعي التكافؤ ، لكنه يمتلك سبع حالات أكسدة ، منها  $+4$  و  $+2$  الأكثر استقراراً ، أما  $-4$  و  $0$  و  $+1$  و  $+3$  و  $+5$  أقل استقراراً [1،6،7].

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

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

الشكل (15) : يوضح موقع الجيرمانيوم في الجدول الدوري [7]



الجدول 4- الخواص الفيزيائية للجيرمانيوم: [ 8،7،4،1 ]

32	العدد الذري
72.64	الكتلة الذرية ( u.a )
1.25	نصف القطر الأيوني ( $A^0$ )
938.25	نقطة الإنصهار ( $^0C$ )
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 النادرة في الطبيعة ( % 3-10 من وزن القشرة الأرضية) فهو لا يتواجد نقيا بل ممزجا في عناصر أخرى بشكل خامات، أغلبها متواجدة بأوكرانيا وروسيا والصين، تستغل هذه الخامات بغية الحصول منها على الجيرمانيوم [3،5].

الجدول (5) - يوضح بعض خامات الجيرمانيوم [1،4]

Argutite	GeO <sub>2</sub>	69.41% Ge
Eyselite	FeGe <sub>3</sub> O <sub>7</sub> (OH)	53.91% Ge
Otjismeite	PbGe <sub>4</sub> O <sub>9</sub>	45.27% Ge
Argyrodite	Ag <sub>8</sub> GeS <sub>6</sub>	6.44% de Ge
Renierite	Complex of ( Cu/ Fe/ Ge/ As)	7.8% Ge
Germanite	Cu <sub>26</sub> Fe <sub>4</sub> Ge <sub>4</sub> S <sub>32</sub>	9.10% Ge



الشكل (16): يوضح معدن رينيريت [2]renierite

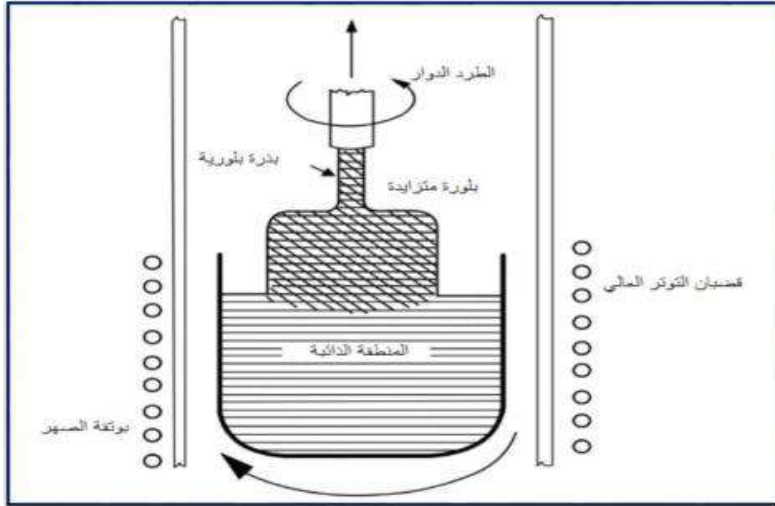
## 4.2- تنقية الجيرمانيوم

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

### 1.4.2- طريقة تشوخرالسكي (Czochralski):

اقترحها العالم البولندي Jan Czochralski ، وهي عملية تستخدم في مجال نمو البلورات في علم المواد من أجل الحصول على بلورة أحادية خلال تجربة قياس سرعة تبلور المعادن ، وفي سنة 1916 أثبتت أنها مفيدة جدا لتبلور العديد من السبائك [3، 11، 10، 12، 13].

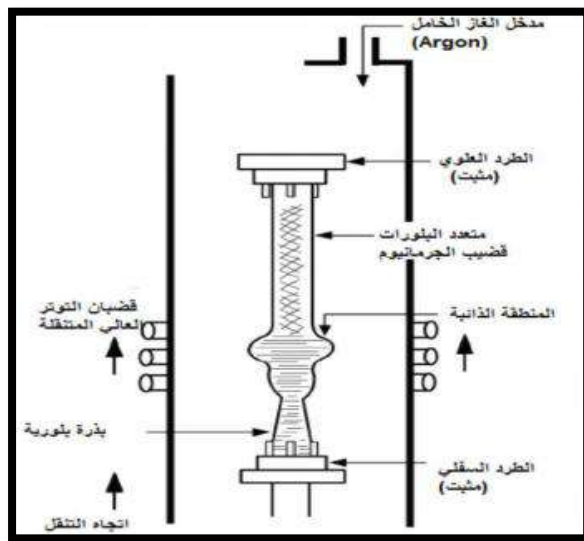
وسنوضح هذه الطريقة أكثر خلال تنقية الجيرمانيوم ، حيث عند صهره في بوتقة داخل فرن يتم سحبه انطلاقا من الوسط ببطء أحادي البلورة ، وذلك بالتزامن مع إبقاء البلورة في حالة دوران من أجل تحقيق تجانس الحمام ومراقبة السطح البيني الصلب - السائل . ويتوقف قطر البلورة النامية على درجة حرارة المصهور ومعدل سحب البلورة ، حيث يقل قطر البلورة عندما يرتفع معدل سحبها من المصهور ، كما يقل إذا ارتفعت درجة حرارة المصهور . تتميز هذه الطريقة بأن البلورة النامية تكون على درجة عالية من الجودة ، كما تمكن من إنشاء بلورات خالية تقريبا من العيوب البلورية الشائعة عند اتباع هذه الطريقة ، من بين هذه البلورات الجيرمانيوم [3، 11، 10، 12، 13].



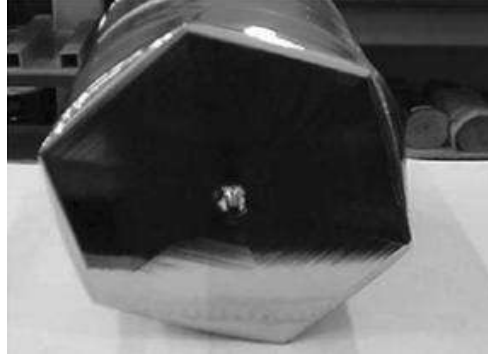
الشكل (17) : يوضح طريقة (Czochralski) [5]

### 2.4.2 - طريقة الصهر النطاقي Float zone

تستخدم تقنية (Fz) للحصول على عنصر الجيرمانيوم عالي النقاوة ، وهي مناسبة لإنتاج رقائق صغيرة مع شوائب منخفضة من الأكسجين ، تعتمد هذه الطريقة على الإذابة المحلية لسبيكة متعددة البلورات مع بذرة واحدة ذات إتجاه محدد ، توضع في فرن من الغاز الخامل وذلك بإنزالها رأسياً إلى الأسفل ببطء ، ويمرر عبر لفائف متحركة تتغذى بمولد للترددات العالية تبدأ من المنطقة المنصهرة وتستمر عند البذرة ، تدار السبيكة بسرعة ثابتة لتجنب تقارب المادة من الوسط وكذلك من أجل الحصول على توزيع منتظم نحو الخارج ، أثناء الإنصهار يكون الفرن معبأ بالغاز الخامل مثل الأرجون لخفض الغازات الشائبة والحصول على سبيكة أحادية البلورة [3,5].



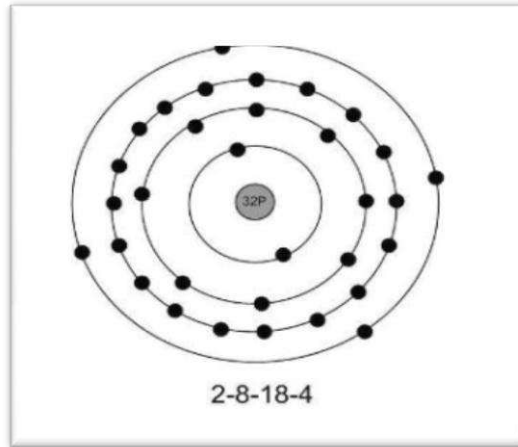
الشكل (18) : يوضح طريقة الصهر النطاقي [5]



الشكل (19) : جيرمانيوم أحادي البلورة [2]

## 5.2- البنية البلورية

نعلم أن المادة متكونة من ذرات ، وبأن الذرة تحتوي على نواة تحيط بها هالة من الإلكترونات ، و إذا فحصنا ذرة الجيرمانيوم منفردة سنجد أنها تحتوي على نواة بها 32 بروتون، عندما تكون هذه الذرة في الحالة العادية Normal state فإنه سيكون بها 32 إلكترون تدور حول النواة. إن هذه الإلكترونات الدوارة حول النواة تتوزع بنمط ثابت:  $2, 8, 18, \dots, 2n^2$  وتملأ الأغلفة Shells المحيطة بالنواة. حيث  $n$  تمثل عدد الأغلفة [9].

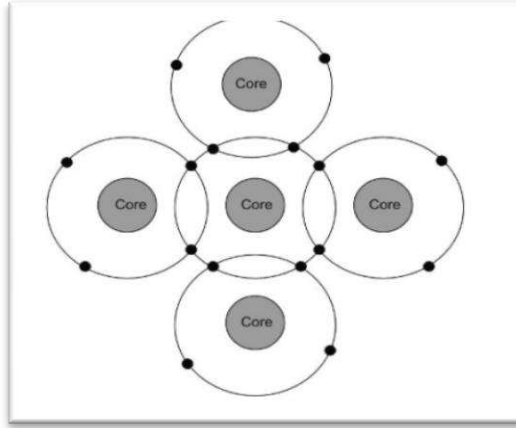


الشكل (20): يوضح ذرة الجيرمانيوم [9]

## 2. 1.5- التكوين البلوري

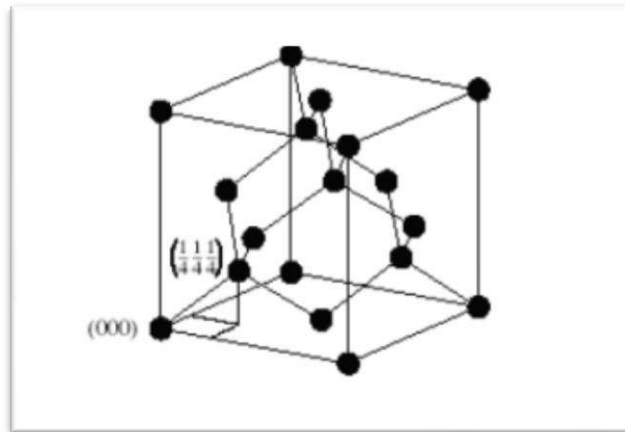
بما أن الغلاف الخارجي لذرة الجيرمانيوم يحتوي على أربعة إلكترونات ، فهذا يعني أن الغلاف ينقصه أربعة إلكترونات حتى يصل إلى حالة التشبع (8 إلكترونات) . ومن حقيقة أن ذرات الجيرمانيوم أثناء ارتباطها لتكوين المادة فإن غلافها الخارجي سيحتوي

على ثمانية إلكترونات ، فإن أربعة من هذه الثمانية ستكون إلكترونات تساهمية من الذرات الأربعة المجاورة . هذا الترتيب للذرات المتجاورة يدعى بالتكوين البلوري. في بلورة الجيرمانيوم النقي تكون كل ذرة محاطة بأربعة ذرات مجاورة والتي في الحقيقة تتشارك بالإلكتروناتها مع الذرة المركزية [9] كما هو مبين في الشكل.21.



الشكل (21) : يوضح الذرات بداخل البلورة [9]

يتبلور الجيرمانيوم هيكل الماس المرتبط تساهمياً كما هو موضح في الشكل (22). تتكون الشبكة البلورية من شبكتين مكعبتين متمركزتي الأوجه (CFC) – Face cubic centred ومتداخلتين بحيث تكون كل منهما مزاحة في إتجاه قطر الخلية المكعبية بمقدار ربع (1/4) طول القطر . ويمكن إعتبارها شبكة مكعبية متمركزة الأوجه ولها قاعدتان ، إحداها عند نقطة الأصل (0,0,0)، والأخرى حيث ثابت الشبكة  $a=5.66 \text{ \AA}^0$  . كل خلية أولية لشبكة الماس تحتوي على 8 ذرات ، ويحيط بكل ذرة أربع ذرات (رقم التناسق) مرتبطة مع بعضها بروابط تكافؤية [3, 5, 8, 10].



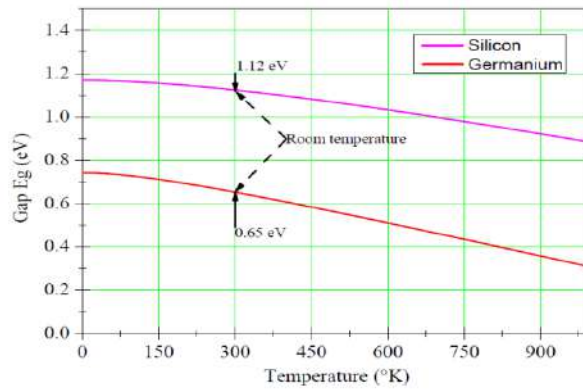
الشكل (22) : رسم تخطيطي يوضح البنية البلورية للجيرمانيوم [8]

## 6.2- الفاصل الطاقي للجيرمانيوم

يقدر فاصل الطاقة  $E_g$  (الفرق بين الطاقة الصغرى لشريط النقل BC والطاقة العظمى لشريط التكافؤ BV) في الجيرمانيوم بـ  $0.66 \text{ eV}$  عند  $300 \text{ }^\circ\text{K}$  ، الأمر الذي يجعله قارئ جيد للإشارات التي أطولها موجاتها محصورة بين  $1.3-1.55$  ميكرو متر، ويؤمن بذلك الوساطة بين المكونات الإلكترونية الضوئية والميكرو إلكترونية العاملة في هذا المجال من الاتصالات . يتغير الفاصل الطاقي للجيرمانيوم بدلالة درجة الحرارة وفق العلاقة التالية [ 3 ]:

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

الشكل (23) يوضح مقارنة بين تغيرات الفاصل الطاقي للجيرمانيوم والفاصل الطاقي للسيليسيوم بدلالة درجة الحرارة [ 16 ] .



الشكل (23) : مقارنة بين تغيرات الفاصل الطاقي للجيرمانيوم والسيليسيوم بدلالة درجة الحرارة .

## 7.2 - تركيز حاملات الشحنة الذاتية

معرفة كثافة حاملات الشحنة في نصف الناقل يعد ضروريا لمعرفة خواصه الكهربائية . في نصف الناقل تحدث عملية معاكسة لعملية الإثارة الحرارية للالكترونات، الالكترونات المنتقلة من عصابة النقل BC تتحد مع الثقوب في عصابة التكافؤ BV مما يؤدي إلى خفض ناقلية النصف الناقل. تكون احتمالية الاتحاد متناسبة مع عدد الالكترونات الحرة في BC وعدد الثقوب الحرة في BV . عند درجة الحرارة T و بين عمليتي الإثارة و الاتحاد توجد حالة توازن ينتج عنها تركيز معين لحاملات الشحنة تعطى وفق العلاقات التالية [3,14,16]:

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

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

ومن قانون فعل الكتلة نجد :

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

في الحالة الذاتية تكون :

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

من خلال العلاقات السابقة عبارة تركيز حاملات الشحنة الذاتية  $n_i$  (كثافة حاملات الشحنة الذاتية في النصف الناقل النقي)

تكون كالتالي :

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \exp\left[-\frac{E_g}{2KT}\right] \quad (6.2)$$

$N_v, N_c$  تمثلان على الترتيب الكثافة الفعالة للإلكترونات في عصابة النقل و الكثافة الفعالة للثقوب في عصابة التكافؤ.

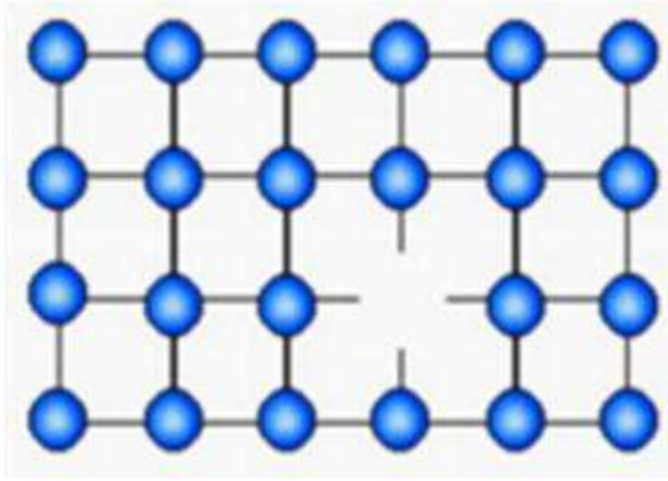
تعطى كثافة حاملات الشحنة الذاتية للجيرمانيوم وفق العلاقة التالية [ 3, 15 ]:

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

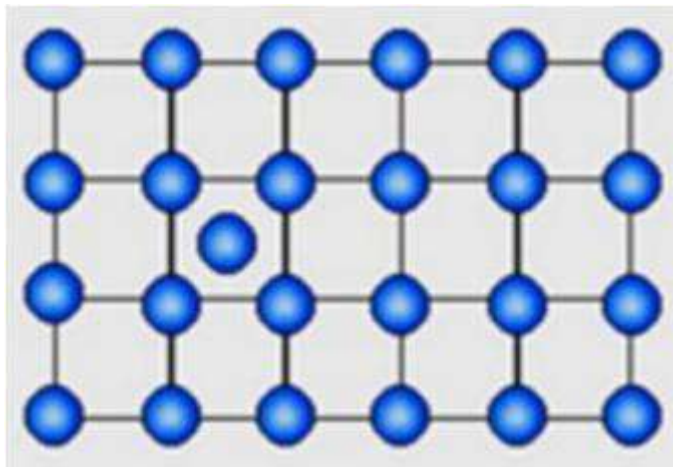
## 8.2- العيوب النقطية للجيرمانيوم

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

في الجيرمانيوم نميز نوعين أساسيين من العيوب النقطية يلعبان الدور الرئيس في انتقال المطعومات داخل المنظومة البلورية للجيرمانيوم. الأول هو الفجوة (vacancy) والتي يرمز لها بالرمز V وتضهر نتيجة غياب ذرة جيرمانيوم عن موضعها في الشبكة البلورية المثالية. العيب الثاني يتمثل في البينية الذاتية (Self-interstitial) وهي عبارة عن ذرة جيرمانيوم منحرفة عن موضعها ومنغرسه في موضع بيني من الشبكة البلورية للجيرمانيوم [3].



الشكل (24): يوضح تواجد الفجوة داخل الشبكة البلورية



الشكل (25): يوضح تواجد البينية الذاتية داخل الشبكة البلورية



### 1.8.2 تركيز العيوب في حالة التوازن

يستند التفسير الفيزيائي لنشوء العيوب البلورية النقطية الى قواعد الديناميكا الحرارية . يعزى السبب الأساسي في تبلور مادة معينة بتركيب بلوري معين الى كون الطاقة الحرة Free Energy المحققة للتوازن الديناميكي تكون أصغر [ 3،18] .

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

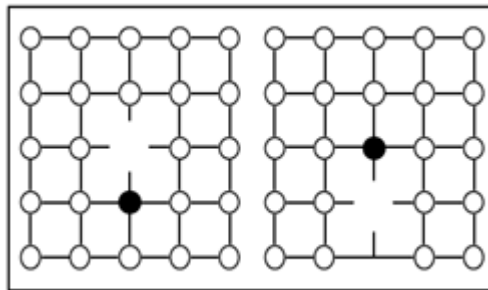
$$c_x = c_s \exp \left[ -\frac{\Delta G_x^f}{KT} \right] \quad (8.2)$$

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 وجهة النظر التكنولوجية والعلمية لدورها في تحفيز المطعومات على الانتشار أثناء عملية تطعيم النصف ناقل. في حالة الأرسونيك الانتشار يتم عبر الفجوات وهو ما يعرف بالآلية الفجوية

### 9.2 آلية الانتشار المجهرية للأرسونيك في الجيرمانيوم

ينتشر الأرسونيك في الجيرمانيوم وفق الآلية الفجوية (vacancy mechanism)، حيث يعتمد هذا الانتشار على وجود الفجوات ( الشكل 26). بوجود فجوة في أحد مواضع الجوار الأقرب تنتقل المطعمة المتواجدة في الموقع الاستبدالي الى موقع الفجوة المجاور. تعرف هذه الآلية بالتبادل البسيط. في حالة وجود قوة تجاذب بين المطعمة والفجوة يبقيان مرتبطين مع بعضهما البعض و يشكلان ثنائية فجوة- مطعمة. هذه الثنائية تنتقل كمركب واحد في الشبكة البلورية وهو ما يدعى بالانتشار بالثنائيات [3].



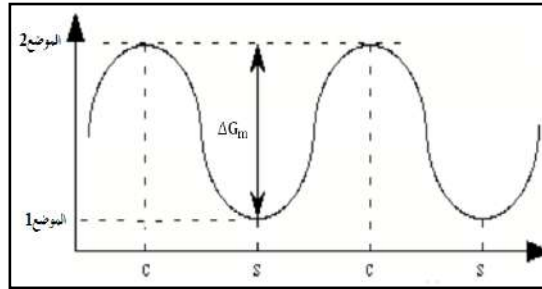
الشكل (26): مخطط يبرز الآلية الفجوية

## 10.2 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 ، و يكون تركيز الالكترونات في مستوى النقل للنصف الناقل مساويا لتركيز حاملات الشحنة الذاتية  $n_i$  [3].

## 1.10.2 الدراسة النظرية لمعامل الانتشار :

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



الشكل (27): الحاجز الكموني أثناء الانتقال من موضع الى آخر

$\Delta G_m$  الطاقة اللازمة لاجتياز الحاجز للوصول الى الموضع 2 الشكل (27).

يرتبط معامل الانتشار في حالة كون الانتشار يكون محفزا بالفجوات ، بتواتر القفز  $\nu$  بالعلاقة التالية [19،20،21]:

$$D = f \cdot \frac{1}{6} a^2 \cdot \nu \quad (9.2)$$

يمثل  $a$  بعد الجوار الاقرب و  $f$  معامل الارتباط و  $\nu$  تواتر القفز .  
حيث تواتر القفز :

$$\nu = \nu_V \cdot P_V \quad (10.2)$$

$\nu_V$  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:

$$P_V = Z \cdot \frac{C}{C_s} \exp\left[-\frac{\Delta E_{AV}}{KT}\right] \quad (12.2)$$

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 المواقع في الشبكة البلورية

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

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

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

عندئذ يكتب معامل الانتشار على النحو التالي:

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

$$D = f \cdot \frac{4}{6} a^2 \cdot v_0 \exp\left[-\frac{\Delta S_x^f + \Delta S_x^m}{T}\right] \exp\left[-\frac{\Delta H_x^f + \Delta H_x^m - E_{AX}}{KT}\right] \quad (17.2)$$

تمثل  $\Delta H_x^m$  انطالي هجرة العيب النقطي

$\Delta S_x^m$  انطروي هجرة العيب النقطي

$\Delta H_x^f$  انطالي تكون العيب النقطي

$\Delta S_x^f$  انطروي تكون العيب النقطي

وتكون عبارة معامل الانتشار من الشكل :

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

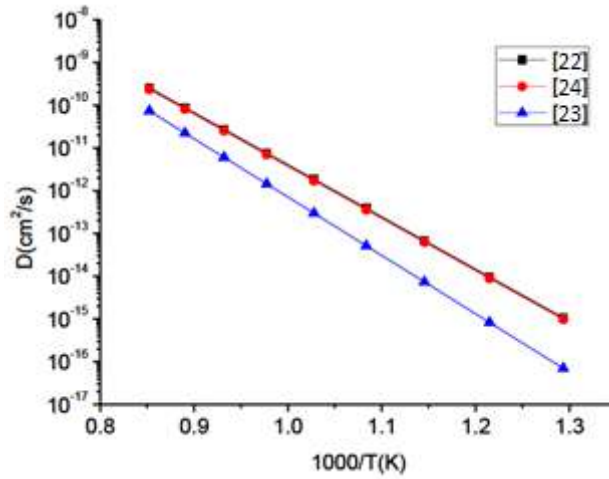
يسمى  $D_0$  الحد الأنطروي و  $E$  طاقة التنشيط حيث:

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

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

## 11.2 معامل انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم:

هناك عدة دراسات تناولت البحث عن كيفية تغير معامل انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم بدلالة درجة الحرارة واستنتاج طاقة التنشيط  $E$  والحد الأنطروي  $D_0$  كما هو مبين في الجدول أدناه.



الشكل (28): يمثل تغيرات معامل انتشار As في الجيرمانيوم حسب المراجع المذكورة

الجدول (6): قيم الحد الأنطروي ل As وطاقة التنشيط في الجيرمانيوم

المطعمة	$D_0(\text{cm}^2\text{s}^{-1})$	$E(\text{eV})$	المرجع
As	6.3	2.42	[22]
As	5.8	2.24	[24]
As	32	2.71	[23]

## 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 سويقات ، أطروحة لنيل شهادة الدكتوراه بعنوان دراسة لنصاف الناقل الجيرمانيوم المطعم للإستعمال في المكونات الإلكترونية الضوئية ، الجزائر- ورقة ، 2015 / 2016 م
- [4] Christmann .P,et all, "panorama mondial 2010 du germanium" ,BRGM/RP,2011
- [5] بن بادة حولة ، مذكرة لنيل شهادة الماستر ل.م.د بعنوان دراسة بالمحاكاة لانتشار الفوسفور في الجيرمانيوم ، جامعة قاصدي مرياح - 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
1. [9] malvino ، ترجمة أسامة عمر مسعود 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 والأشعة السينية ، دار الفكر العربي ، مصر ، الطبعة الأولى 1426 هـ / 2005 م

- [11]E. Talik and M. Oboz , " Czochralski Method for Crystal Growth of Reactive Intermetallics" , 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 قعقع ، الإلكترونيات الأساسية (الإلكترونيات 1) ، جامعة دمشق كلية العلوم
- [15]عبد القادر سويقات ، مذكرة مقدمة لنيل شهادة الماجستير بعنوان نمذجة ومحاكاة إنتشار المطعومات في السيليسيوم والجيرمانيوم أحادي البلورة ، جامعة قاصدي مرياح 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 شهادة دكتوراه دولة بعنوان تطوير نموذج السطح المسنن للخلايا الشمسية للحصول على مردود طاقي عالي ، جامعة باجي مختار – عنابة ، 2009 / 2010 م.
- [18]د.سعود بن حميد اللحياني ، فيزياء الجوامد ، جامعة أم القرى ، كلية العلوم التطبيقية ، شعبة الفيزياء 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 الأرسونيك في الجيرمانيوم

تمهيد :

في هذا الفصل قمنا بنمذجة انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم بالآلية الفجوية، آخذين بعين الاعتبار أن فجوات الجيرمانيوم ثنائية الشحنة السالبة هي التي تساهم في انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم. قمنا بعد ذلك بحل المعادلة التفاضلية الجزئية لقانون فيك الثاني بطريقة الفروق المتناهية. وتطرقنا إلى برنامج لمحاكاة.

### 1.3 نمذجة انتشار الأرسونيك:

ينتشر الأرسونيك في الجيرمانيوم بالآلية الفجوية، بالأخذ بعين الاعتبار مساهمة الفجوات ثنائية الشحنة السالبة في هذا الانتشار معامل الانتشار يعبر عنه بالعلاقة التالية [1]:

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

$D^=$  معامل الانتشار عبر فجوات الجيرمانيوم ثنائية الشحنة السالبة. نستطيع في هذه الحالة أن نعبر على معامل الانتشار بالعلاقة التالية:

$$D = \frac{D^=}{n_i^2} n^2 \quad (2.3)$$

$$D = \alpha n^2 \quad (3.3)$$

$\alpha$  يمثل عامل التناسب التربيعي بين معامل انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم وكثافة الإلكترونات الحرة  $n$ .

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

$$n = \frac{1}{2} \left( c + \sqrt{c^2 + 4n_i^2} \right) \quad (4.3)$$

عبارة التدفق للأرسونيك في الجيرمانيوم تكتب كالتالي :



$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x} + uc \quad (5.3)$$

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

تعطى قيمة u وفق العبارة التالية [2]:

$$u = \mu E \quad (6.3)$$

تمثل  $\mu$  حركية الفرد المنتشر (الأرسونيك) وتعطى بوحدة  $(\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1})$ .

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

$$E = -\frac{kT}{q} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (7.3)$$

من جهة ثانية حسب علاقة اينشبلين [3]:

$$\mu = \frac{qD}{kT} \quad (8.3)$$

بالتعويض في عبارة z نجد:

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x} - Dc \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (9.3)$$

العبارة الأخيرة يمكن كتابتها على النحو التالي :

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x} - Dc \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial c} \frac{\partial c}{\partial x} \quad (10.3)$$

$$j = -D \left( 1 + c \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial c} \right) \frac{\partial c}{\partial x} \quad (11.3)$$

بعد الاشتقاق والتعويض عبارة التدفق يعبر عنها كالتالي :

$$j = - \left[ 1 + \frac{c}{2n_i} \left( \left( \frac{c}{2n_i} \right)^2 + 1 \right)^{-1/2} \right] D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (12.3)$$

$$j = -hD \frac{\partial c}{\partial x} \quad (13.3)$$

المقدار  $h$  يدعى بمعامل التسريع الكهربائي حيث :

$$h = 1 + \frac{C}{2n_i} \left( \left( \frac{C}{2n_i} \right)^2 + 1 \right)^{-1/2} \quad (14.3)$$

المقدار  $hD$  يدعى بمعامل الانتشار الفعال :

$$D^{\text{eff}} = hD \quad (15.3)$$

عندئذ معامل الانتشار الفعال يمكن كتابته على النحو التالي :

$$D^{\text{eff}} = h\alpha n^2 \quad (16.3)$$

والتدفق يكتب بالشكل:

$$j = -D^{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial x} \quad (17.3)$$

### 2.3 القانون الثاني لـ فيك :

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

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial j}{\partial x} \quad (18.3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D^{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial x} \right] \quad (19.3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D^{\text{eff}} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial c}{\partial x} \frac{\partial D^{\text{eff}}}{\partial x} \quad (20.3)$$

### 3.3 محاكاة منحنيات الانتشار

محاكاة منحنيات انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم 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 (20.3)

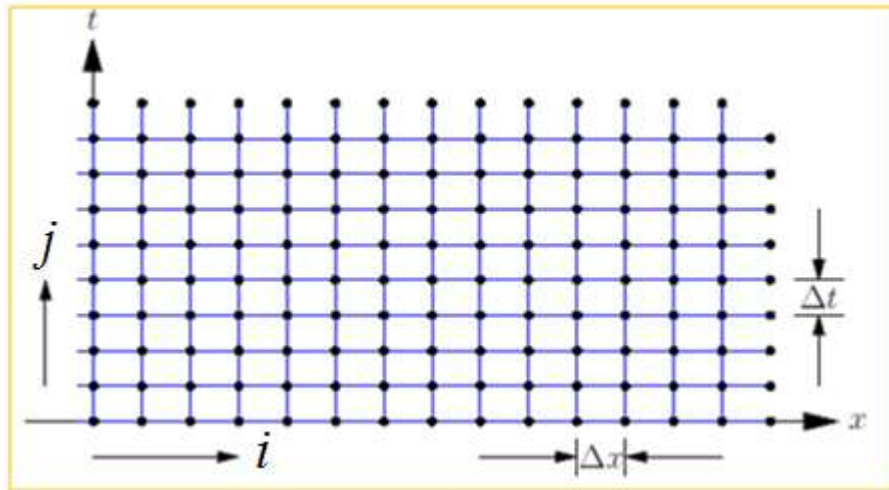
بتقريبات الفروق المتناهية التالية:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t} (c_i^j - c_i^{j-1}) \quad (21.3)$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} (c_{i+1}^j - c_i^j) \quad (22.3)$$

$$\frac{\partial D^{\text{eff}}}{\partial x} = \frac{1}{\Delta x} \left( (D^{\text{eff}})_{i+1}^j - (D^{\text{eff}})_i^j \right) \quad (23.3)$$

$$D^{\text{eff}} \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = (D^{\text{eff}})_i^j \frac{c_{i-1}^j - 2c_i^j + c_{i+1}^j}{\Delta x^2} \quad (24.3)$$



الشكل (29): 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

(19.3)-(23.3) نحصل على المعادلة العامة والتي تربط التركيز في اللحظة  $j\Delta t$  بالتركيز في اللحظة  $(j-1)\Delta t$ :

$$c_i^{j-1} = -\delta_i^j c_{i-1}^j + (1 + \delta_i^j + \delta_{i+1}^j) c_i^j - \delta_{i+1}^j c_{i+1}^j \quad (25.3)$$

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

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

$$c_0^j = c_1^j \quad (26.3)$$

$$c_N^j = c_{N+1}^j \quad (27.3)$$

انطلاقا من المعادلات (24,3)،(25,3)،(26,3) 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  $\mathbf{Bc}=\mathbf{a}$  حيث:

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

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

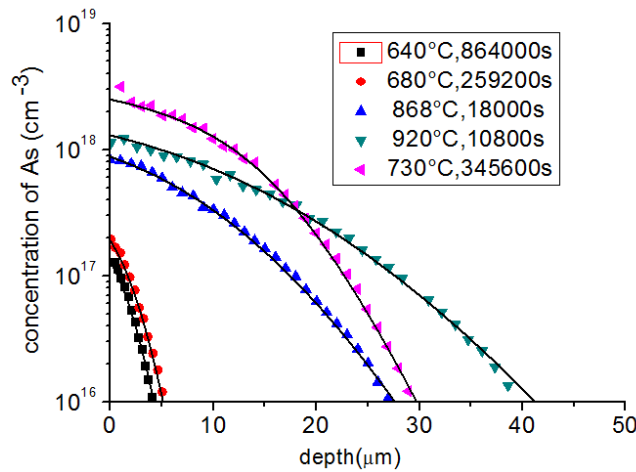
الحل العددي للنظام المصفوفي الثلاثي القطري الذي تحصلنا عليه، تم باستخدام خوارزمية توماس (Thomas Algorithm)، والتي تقوم أساساً على طريقة التفكيك (LU decomposition Method).

خلال محاكاة المنحنيات التجريبية [1] اخترنا قيم عامل التناسب التربيع و قيم تركيز حاملات الشحنة الذاتية الموافقة لدرجة حرارة الانتشار التي تحقق تطابق منحنيات المحاكاة مع المنحنيات التجريبية.

### 4.3 نتائج ومناقشة :

#### 1.4.3 محاكاة المنحنيات التجريبية و مقارنتها :

يوضح الشكل (30) المنحنيات التجريبية و المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة لانتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم عند درجة حرارة ومدة زمنية معينتين. نلاحظ مدى تطابق منحنيات المحاكاة مع منحنيات التجريبية مما يبين أن نموذج الانتشار بالفجوات الشائبة السالبة يصف بدقة انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم



الشكل(30): المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة ( الخطوط المستمرة ) والمنحنيات التجريبية [1] لانتشار الأرسونيك في

الجيرمانيوم

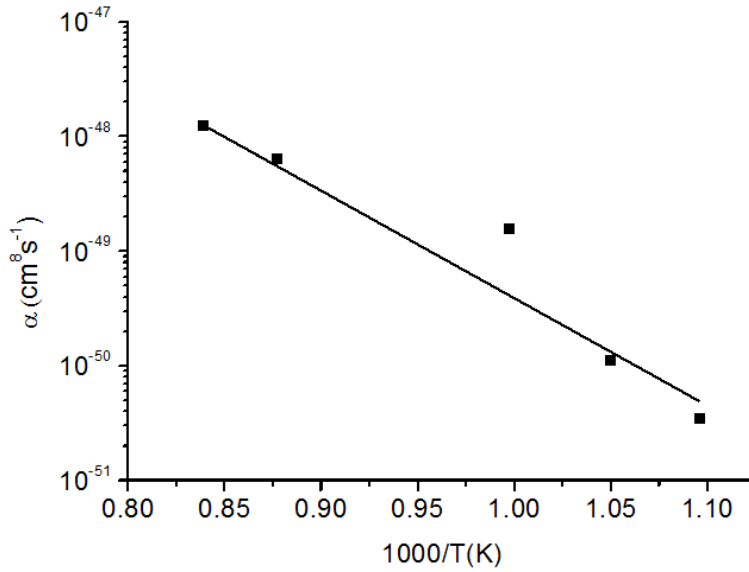
الجدول (7) : قيم التركيز الابتدائي على السطح ، معامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة انتشار الفسفور

في الجيرمانيوم المستعملة في المحاكاة .

المطعمة	$C_0$ (cm <sup>-3</sup> )	t(s)	T (°c)	$n_i$ (cm <sup>-3</sup> )	$\alpha$ (cm <sup>8</sup> s <sup>-1</sup> )
As	$1.3 \times 10^{17}$	864000	640	$3.00 \times 10^{18}$	$3.56 \times 10^{-51}$
As	$1.9 \times 10^{17}$	259200	680	$3.40 \times 10^{18}$	$1.13 \times 10^{-50}$
As	$2.5 \times 10^{18}$	345600	730	$2.80 \times 10^{18}$	$1.59 \times 10^{-49}$
As	$1.3 \times 10^{18}$	10800	920	$9.10 \times 10^{18}$	$1.27 \times 10^{-48}$
As	$8.8 \times 10^{17}$	18000	868	$7.00 \times 10^{18}$	$6.43 \times 10^{-49}$

### 2.4.3 عامل التناسب التربيعي:

إنطلاقاً من معطياتنا المستخدمة في المحاكاة استطعنا رسم المنحنى البياني الممثل لتغيرات عامل التناسب التربيعي بين انتشارية الأرسونيك في الجيرمانيوم وكثافة الإلكترونات الحرة بدلالة مقلوب درجة الحرارة كما هو مبين في الشكل (31).



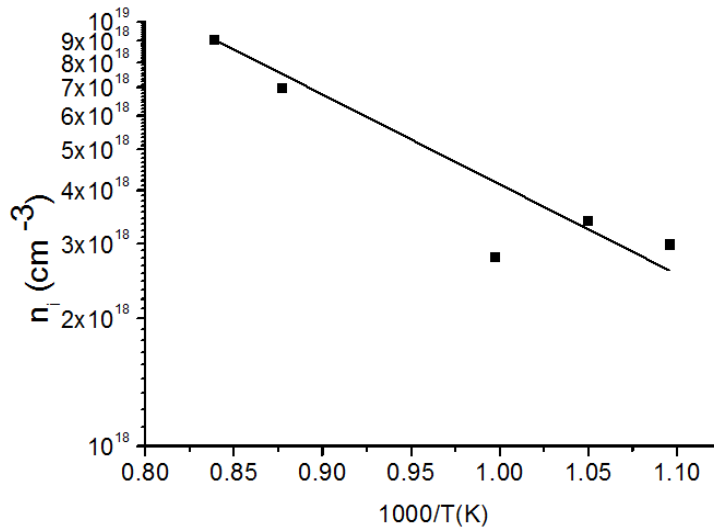
الشكل (31) : تغيرات عامل التناسب التربيعي مع مقلوب درجة الحرارة.

من خلال تغيرات عامل التناسب التربيعي بدلالة مقلوب درجة الحرارة ، وجدنا أن هذا الأخير يرتبط بدرجة الحرارة وفق العلاقة التالية :

$$\alpha = 0.91 \times 10^{-40} \exp\left(\frac{-1.86eV}{kT}\right) \quad (\text{cm}^8 \text{s}^{-1}) \quad (28.3)$$

### 3.4.3 حاملات الشحنة الذاتية:

المنحنى المبين في الشكل 32 يمثل تغيرات تركيز حاملات الشحنة الذاتية  $n_i$  بدلالة مقلوب درجات الحرارة، المتحصل عليه من معطياتنا المستخدمة في المحاكاة والمبينة في الجدول (7).



الشكل (32) : تغيرات تركيز حاملات الشحنة الذاتية  $n_i$  بدلالة مقلوب درجات الحرارة

من خلال تغيرات تركيز حاملات الشحنة الذاتية  $n_i$  بدلالة مقلوب درجة الحرارة ، وجدنا أن هذا الأخير يرتبط بدرجة الحرارة وفق العلاقة التالية :

$$n_i = 5.4 \times 10^{20} \exp\left(-\frac{0.42eV}{kT}\right) \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (29.3)$$

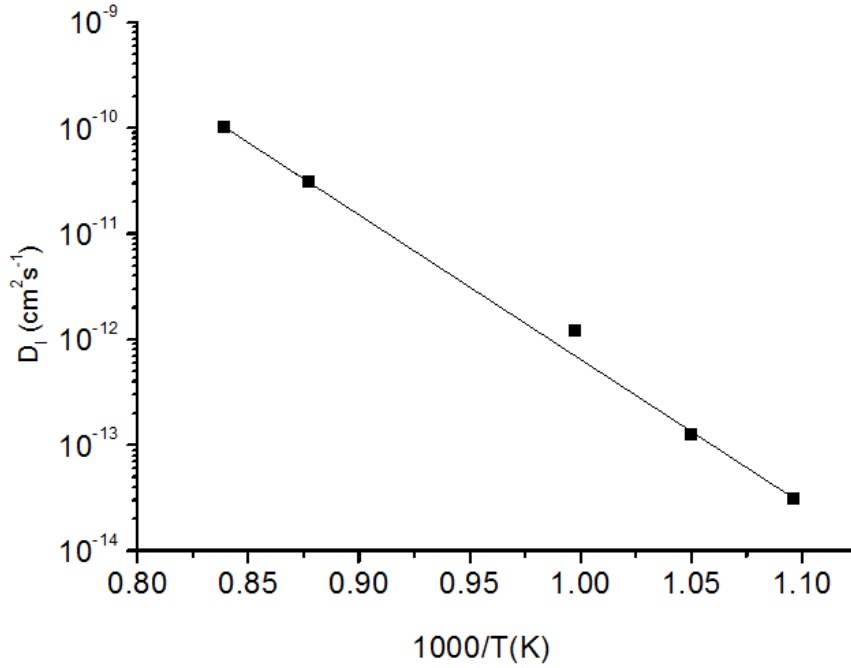
### 4.4.3 معامل الانتشار الذاتي:

في حالة الانتشار الذاتي يكون لدينا

$$D_i = \alpha n_i^2 \quad (30.3)$$

الجدول (8) : قيم معامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم

T (°C)	640	680	730	920	868
$D_i(\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	$3.20 \times 10^{-14}$	$1.31 \times 10^{-13}$	$1.25 \times 10^{-12}$	$1.05 \times 10^{-10}$	$3.15 \times 10^{-11}$



الشكل (33) : تغيرات معامل الانتشار الذاتي بدلالة مقلوب درجات الحرارة

يتغير معامل الانتشار الذاتي بدلالة درجة الحرارة وفق العلاقة التالية:

$$D_i = 29 \times \exp\left(-\frac{2.71\text{eV}}{kT}\right) \quad (\text{cm}^2 \text{s}^{-1}) \quad (31.3)$$

حيث طاقة تنشيط الأرسونيك في الجيرمانيوم

$$E = 2.71\text{eV}$$



## مراجع الفصل الثالث

- [1] S. Brotzmann and H. Bracht: « Intrinsic and extrinsic diffusion of phosphorus, arsenic, and antimony in germanium», Appl. Phys. **103**, 033508 (2008).
- [2] Daniel Mathiot , " Dopage et diffusion dans le Silicium", In ESS, UMR 7163 , Laboratoire Commun CNRS-ULP , 2004.
- [3] J.R.King,and C.P.Pleese," Diffusion of Dopants in Crystalline Silicon : An Asymptotic Analysis " , Ima Journl of Appl.Math.37,185-197.1986.

الخاتمة

## الخاتمة العامة

تكتسي عملية تطعيم أنصاف النواقل أهمية بالغة في عصرنا الحالي لما تلعبه من دور مهم في تكنولوجيا الصناعة الالكترونية والالكترونية الضوئية. أحد الوسائل المعتمدة في التطعيم، هو الانتشار الحراري، الذي معرفة آليته ومعامله تعد ضرورية للتحكم في تحقيق مكونات الكترونية دقيقة عالية الأداء. تناولنا دراسة انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم باعتباره مرشحا واعداد لتطوير هذه المكونات .

- 640-868 فبعد نمذجة ومحاكاة منحنيات الانتشار التجريبية للأرسونيك في الجيرمانيوم في مجال درجة حرارة محصور بين 640-868 درجة مئوية، بالآلية الفجوية آخذين بعين الاعتبار مساهمة الفجوات ثنائية الشحنة السالبة توصلنا الى مايلي:
- نموذج الانتشار بالفجوات ثنائية الشحنة السالبة يصف بدقة انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم.
  - تتناسب انتشارية الأرسونيك في الجيرمانيوم تربيعيا مع كثافة الالكترونات الحرة .
  - يرتبط كل من عامل التناسب التربيعي، تركيز حاملات الشحنة و معامل الانتشار الذاتي بدرجة الحرارة وفق العلاقات المبينة أدناه :

$$\alpha = 0.91 \times 10^{-40} \exp\left(\frac{-1.86eV}{kT}\right) \quad (\text{cm}^8 \text{s}^{-1})$$

$$n_i = 5.4 \times 10^{20} \exp\left(-\frac{0.42eV}{kT}\right) \quad (\text{cm}^{-3})$$

$$D_i = 29 \times \exp\left(-\frac{2.71eV}{kT}\right) \quad (\text{cm}^2 \text{s}^{-1})$$

- طاقة تنشيط الأرسونيك في الجيرمانيوم:  $E=2.71eV$ .

## ملخص:

حركية حاملات الشحنة المرتفعة، قصر الفاصل الطاقي للجرمانيوم جدد الاهتمام بالجرمانيوم لمواصلة التطور التاريخي للمكونات الالكترونية. للحصول على مكونات الكترونية أساسها الجرمانيوم عالية الأداء، من الضروري فهم انتشار المطعمات في هذا النصف ناقل. حالياً، إنتشار مطعمات النوع السالب في الجرمانيوم على الغالب ينمذج بانتشارية تتناسب تربيعياً مع كثافة الالكترونات الحرة.

في هذه المذكرة حددنا كيفية ارتباط عامل التناسب التربيعي لانتشارية الأرسونيك في الجرمانيوم بدرجة الحرارة، من خلال محاكاة منحنيات الانتشار التجريبية للأرسونيك في الجرمانيوم في مجال درجة حرارة محصور بين 640-868 درجة مئوية. محاكاة دقيقة تم تحقيقها في هذا المجال من درجة الحرارة أخذين بعين الاعتبار التناسب التربيعي بين انتشارية الأرسونيك وكثافة الالكترونات الحرة.

## Abstract:

High intrinsic carrier mobility, small band gap for germanium have prompted renewed interest in germanium to continue the historic progress of electronic devices. To obtain efficient germanium-based electronic devices, it is necessary to understand the dopant diffusion in this semiconductor. Up to now, n-type dopant diffusion in germanium at most is modeled by diffusivity proportional to the square of the free electron density ( $n$ ). This study determines the temperature dependence of the quadratic proportionality factor of the As diffusivity with the free electron density, through simulations of experimental As diffusion profiles in the temperature range from 640 to 868 °C. Accurate simulation is achieved within that temperature range, taking into account the quadratic proportionality between the phosphorus diffusivity and the free electron density.