



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة قاصدي مرباح ورقلة

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفيزياء

أطروحة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه علوم

تخصص فيزياء المواد

من طرف : سويقات عبد القادر

تحت عنوان

دراسة لنصف الناقل الجيرمانيوم المطعم للاستعمال في المكونات الالكترونية  
الضوئية

Etude du semi-conducteur Germanium dopé à l'usage des  
composants optoélectroniques

تاريخ المناقشة: 2016/02/29

أمام لجنة المناقشة

رئيسا  
مناقشا  
مناقشا  
مناقشا  
مشرفا ومقررا  
مساعد مشرف

أستاذ تعليم عالي جامعة قاصدي مرباح ورقلة  
أستاذ تعليم عالي جامعة حمه لخضر الوادي  
أستاذ محاضر (أ) جامعة حمه لخضر الوادي  
أستاذ تعليم عالي جامعة محمد خيضر بسكرة  
أستاذ تعليم عالي جامعة قاصدي مرباح ورقلة  
أستاذ تعليم عالي جامعة قاصدي مرباح ورقلة

خلفاوي فتحي  
رحومة فرحات  
محبوب محمد الصادق  
وهاب عبد الوهاب  
عيادي كمال الدين  
باحمد داودي

السنة الجامعية: 2015/2016

---

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

رَبِّ أَوْزِعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ  
عَلَيَّ وَعَلَىٰ وَالِدَيَّ وَأَنْ أَعْمَلَ صَالِحًا تَرْضَاهُ  
وَأَصْلِحْ لِي فِي ذُرِّيَّتِي إِنِّي تُبْتُ إِلَيْكَ  
وَإِنِّي مِنَ الْمُسْلِمِينَ

## شكر و تقدير:

الحمد لله أولا وآخرا كما يجب ربنا ويرضى ، وأشكره سبحانه وتعالى على ما أنعم به من اتمام هذا العمل بمنه وفضله وكرمه .

وبعد شكر الله أتقدم بالشكر الجزيل لأستاذي الفاضل الأستاذ الدكتور **عيادي كمال الدين** أستاذ التعليم العالي بجامعة قاصدي مرباح ورقلة على قبوله الاشراف على هذه الرسالة وعلى الجهد الكبير الذي بذله طيلة فترة البحث وحرصه على تقدم البحث بصورة جيدة، وبالرغم من مشاغله والتزاماته الا أنه أبدى اهتماما بالغاً ومتابعة مستمرة للبحث، وأعطى من وقته الخاص الكثير لاتمام هذا العمل. والشكر موصول الى الأستاذ الدكتور **باحمد داودي** أستاذ التعليم العالي بجامعة قاصدي مرباح ورقلة المشرف المساعد.

- كما يسرني أن أتقدم بجزيل الشكر والتقدير إلى الأستاذ الدكتور **فتحي خلفاوي** أستاذ التعليم العالي بجامعة قاصدي مرباح ورقلة على قبوله ترأس لجنة المناقشة .

- كما يسرني أن أتوجه بالشكر الخالص إلى كل من الأستاذ الدكتور **رحومة فرحات** أستاذ التعليم العالي بجامعة الوادي و الأستاذ الدكتور **محبوب محمد الصادق** أستاذ محاضر بجامعة الوادي، اللذين شرفاني بقبولهما المشاركة في لجنة المناقشة.

- كما يسرني أن أتقدم بجزيل الشكر إلى الأستاذ الدكتور **وهاب عبد الوهاب** أستاذ التعليم العالي بجامعة بسكرة الذي شرفني بقبوله المشاركة في لجنة المناقشة.

والشكر موصول إلى القائمين على مخبر تطوير الطاقات الجديدة والمتجددة في المناطق الجافة والصحراوية على التسهيلات المقدمة من أجل انجاز هذا البحث.

كما لا يفوتني أن أشكر إدارة جامعة قاصدي مرباح بورقلة، فهي التي أتاحت لي هذه الفرصة التي طالما حلمت بها، و إلى أساتذة قسم الفيزياء .

إلى والدي حفظهما الله. إلى أسرتي الذين شجعوني على اتمام هذا العمل والى الأستاذ اسماعيل سويقات خاصة على مراجعته اللغوية لهذه الرسالة. إلى هؤلاء جميعاً أقدم امتناني وعرفاني وخالص تشكراتي.

الفهرس

الصفحة	العنوان	
11	مقدمة.....	
15	الفصل الأول: خواص الجيرمانيوم .....	
16	تمهيد	
16	1.1	تواجد الجيرمانيوم في الطبيعة.....
17	2.1	اكتشاف الجيرمانيوم.....
17	3.1	تنقية الجيرمانيوم.....
19	4.1	خواص الجيرمانيوم.....
19	1.4.1	البنية البلورية.....
20	2.4.1	الفاصل الطاقوي.....
22	3.4.1	تركيز حاملات الشحنة.....
23	5.1	العيوب النقطية في الجيرمانيوم.....
25	1.5.1	تركيز العيوب في حالة التوازن.....
27	2.5.1	العيوب النقطية المشحونة.....
27	6.1	الحالات الشحنية لفجوات الجيرمانيوم.....
27	1.6.1	دراسات نظرية حول فجوات الجيرمانيوم.....
28	2.6.1	دراسات نظرية حول المراكز E.....
28	3.6.1	دراسات تجريبية حول المراكز E.....
30	خلاصة	
31	الفصل الثاني: الجانب النظري للانتشار.....	
32	تمهيد.....	
32	1.2	التطعيم.....
32	1.1.2	التطعيم من النوع N.....
34	2.1.2	التطعيم من النوع p.....
36	2.2	طرق التطعيم.....
36	1.2.2	الغرس الأيوني.....

37	الانتشار.....	2.2.2	
39	منابع الشوائب المطعمة.....		3.2
39	آليات الانتشار المجهرية.....		4.2
39	الانتشار الفجوي.....	1.4.2	
41	الانتشار البيئي.....	2.4.2	
42	معامل الانتشار الذاتي.....		5.2
42	الدراسة النظرية لمعامل الانتشار.....	1.5.2	
44	دراسات حول معامل الانتشار في الجيرمانيوم.....		6.2
45	حالة الفوسفور.....	1.6.2	
45	حالة الارسنيك As.....	2.6.2	
46	حالة الأنتيموان.....	3.6.2	
47	قوانين الأنتشار.....		7.2
47	القانون الأول لفيك.....	1.7.2	
48	القانون الثاني لفيك.....	2.7.2	
48	خلاصة.....		
50	الفصل الثالث: نمذجة ومحاكاة انتشار As,Sb,P في الجيرمانيوم.....		<b>3</b>
51	تمهيد.....		
51	معامل الانتشار الفعال.....		1.3
51	حالة الانتشار بالثنائيات.....	1.1.3	
55	حالة الانتشار بالتبادل البسيط.....	2.1.3	
57	معامل انتشار مطعمات النوع السالب بدلالة نسبة المساهمات.....		2.3
58	محاكاة عددية		3.3
58	طريقة الحل العددي للقانون الثاني لFick.....	1.3.3	
60	الشروط الحدية.....	2.3.3	
61	محاكاة الانتشار.....		4.3
61	التحقق من دقة الحلول العددية.....		5.3
62	خلاصة		
63	الفصل الرابع: نتائج ومناقشة.....		<b>4</b>

64	تمهيد.....	
64	دقة الحلول العددية.....	1.4
66	حالة انتشار الفسفور.....	2.4
69	1.2.4 خلاصة نتائج انتشار الفسفور.....	
70	حالة الأنتيموان.....	3.4
73	1.3.4 خلاصة نتائج انتشار الأنتيموان.....	
74	حالة الأرسونيك.....	4.4
78	1.4.4 خلاصة نتائج انتشار الأرسونيك.....	
79	خاتمة.....	
82	المراجع.....	
86	منشورات ومدخلات.....	

قائمة المقادير ورموزها

المقدار	الرمز	الوحدة
مستوي النقل	$E_c$	eV
عرض العصابة الممنوعة	$E_g$	eV
مستوى التكافؤ	$E_v$	eV
ثابت بولتزمان	k	eV.K <sup>-1</sup>
تركيز الالكترونات الحرة	n	cm <sup>-3</sup>
تركيز الثقوب	p	cm <sup>-3</sup>
الكثافة الفعالة للحالات في عصابة النقل	$N_c$	cm <sup>-3</sup>
الكثافة الفعالة للحالات في عصابة التكافؤ	$N_v$	cm <sup>-3</sup>
كثافة الحاملات الذاتية	$n_i$	cm <sup>-3</sup>
درجة الحرارة	T	K
معامل الانتشار	D	cm <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
تركيز الشائبة المطعم	C	atom/cm <sup>3</sup>

## قائمة الأشكال

الرقم	محتوى الشكل	صفحة
1	يوضح التزايد الأسي لعدد الترانزستورات في المعالج الدقيق.....	14
2	سبائك من الجيرمانيوم.....	16
3	أول ترانزستور في 1947.....	17
4	طريقة Czochralski.....	18
5	يوضح طريقة منطقة الذوبان.....	19
6	البنية البلورية للجيرمانيوم.....	19
7	مخطط عصابات الطاقة للجيرمانيوم.....	21
8	تغيرات الفاصل الطاقوي للجيرمانيوم والسيليسيوم بدلالة درجة الحرارة.....	21
9	تغيرات كثافة حاملات الشحنة للجيرمانيوم مع درجة الحرارة.....	23
10	يوضح تواجد الفجوة داخل الشبكة البلورية.....	24
11	يوضح تواجد البنية الذاتية داخل الشبكة البلورية.....	24
12	يبين مستويات الفجوات المشحونة داخل العصابة الممنوعة.....	28
13	يبين مختلف الحالات للمراكز E في العصابة الممنوعة للجيرمانيوم.....	29
14	يوضح التطعيم من النوع السالب وتحرر الأليكترون.....	33
15	يوضح مستوى المانحات المشغول بالالكترونات وانتقالها الى عصابة النقل بعد اثارها	33
16	يوضح التطعيم من النوع الموجب وتحرر الثقب.....	35
17	يوضح المستويات الطاقوية للآخذات داخل العصابة الممنوعة.....	36
18	مخطط يبرز آلية الغرس الأيوني.....	37
19	منحنيات الانتشار الذاتي خلال مرحلة التوضع.....	38
20	منحنيات الانتشار الذاتي خلال مرحلة التوزيع.....	38
21	مخطط يبرز الآلية الفجوية.....	40
22	يوضح آلية ( turnbull - Franck ).....	40
23	آلية الانتشار وفق البنيات الذاتية.....	41
24	آلية كيك-آوت.....	42
25	الحاجز الكمومي أثناء الانتقال من موضع الى آخر.....	42

45	يمثل تغيرات معامل انتشار p في الجيرمانيوم حسب المراجع المذكورة.....	26
46	يمثل تغيرات معامل انتشار As في الجيرمانيوم.....	27
46	يمثل تغيرات معامل انتشار As في الجيرمانيوم.....	28
59	يوضح تجزئة البعد وزمن الانتشار.....	29
64	مقارنة الحلول العددية مع الحقيقية.....	30
66	المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة والتجريبية المقاسة بواسطة SIMS للفسفور.....	31
67	المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة والتجريبية المقاسة بواسطة SRP للفسفور.....	32
68	تغيرات نسبة المساهمات لانتشار الفسفور عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبا في الجيرمانيوم بدلالة مقلوب درجة الحرارة.....	33
69	تغيرات معاملات الانتشار الذاتية للفسفور عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبا في الجيرمانيوم بدلالة مقلوب درجة الحرارة.....	34
70	المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة والتجريبية المقاسة بواسطة SRP للأنتيموان....	35
71	المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة والتجريبية المقاسة بواسطة SIMS للأنتيموان...	36
72	تغيرات نسبة المساهمات لانتشار الأنتيموان عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبا في الجيرمانيوم بدلالة مقلوب درجة الحرارة.....	37
73	تغيرات معاملات الانتشار الذاتية للأنتيموان عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبا في الجيرمانيوم بدلالة مقلوب درجة الحرارة.....	38
74	المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة والتجريبية المقاسة بواسطة SRP للأرسونيك....	39
75	المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة والتجريبية المقاسة بواسطة SRP للأرسونيك.....	40
76	تغيرات نسبة المساهمات لانتشار الأرسونيك عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبا في الجيرمانيوم بدلالة مقلوب درجة الحرارة.....	41
77	تغيرات معاملات الانتشار الذاتية للأرسونيك عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبا في الجيرمانيوم بدلالة مقلوب درجة الحرارة.....	42

## قائمة الجداول

الصفحة	محتوى الجدول	الرقم
17	أهم الخامات التي تحتوي على الجيرمانيوم.....	1
23	يلخص بعض خواص الجيرمانيوم.....	2
34	بين قيم طاقة التأين مقدرة ب eV لبعض الشوائب المانحة.....	3
35	بين قيم طاقة التأين مقدرة ب eV لبعض الشوائب الآخذة.....	4
39	منابع المطعومات.....	5
45	قيم الحد الأنطروي ل p وطاقة التنشيط في الجيرمانيوم.....	6
45	قيم الحد الأنطروي ل As وطاقة التنشيط في الجيرمانيوم.....	7
46	قيم الحد الأنطروي للآثمد وطاقة التنشيط.....	8
65	مقارنة الحلول العددية بالحقيقية.....	9
66	قيم التركيز الابتدائي على السطح، نسبة المساهمات $\beta$ ، حاملات الشحنة الذاتية ومعامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة وأزمنة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم المستعملة في محاكاة المنحنيات التجريبية المقاسة بواسطة ( SIMS ).....	10
67	قيم التركيز الابتدائي على السطح، نسبة المساهمات $\beta$ ، حاملات الشحنة الذاتية ومعامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة وأزمنة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم المستعملة في محاكاة المنحنيات التجريبية المقاسة بواسطة ( SRP ).....	11
70	قيم التركيز الابتدائي على السطح، نسبة المساهمات $\beta$ ، حاملات الشحنة الذاتية ومعامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة وأزمنة انتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم المستعملة في محاكاة المنحنيات التجريبية المقاسة بواسطة ( SRP ).....	12
71	قيم التركيز الابتدائي على السطح، نسبة المساهمات $\beta$ ، حاملات الشحنة الذاتية ومعامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة وأزمنة انتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم المستعملة في محاكاة المنحنيات التجريبية المقاسة بواسطة ( SIMS ).....	13
74	قيم التركيز الابتدائي على السطح، نسبة المساهمات $\beta$ ، حاملات الشحنة الذاتية ومعامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة وأزمنة انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم المستعملة في محاكاة المنحنيات التجريبية المقاسة بواسطة ( SRP ).....	14

ترجمة أهم المفردات المستخدمة في هذه الأطروحة

Band gap	عصابة ممنوعة
conduction band	عصابة النقل
Valence band	عصابة التكافؤ
Band Structure	مخططات عصابات الطاقة
Punctual defects	العيوب النقطية
vacancies	الفجوات
Self-interstitials	البينيات الذاتية
Diffuse species	فرد منتشر
intrinsic diffusion	انتشار ذاتي
Extrinsic diffusion	انتشار لاذاتي
Interstitial mechanism	آلية بينية
vacancy mechanism	آلية فجوية
Diffusion by pairs	انتشار بالثنائيات
Intrinsic Diffusion Coefficient	معامل الانتشار الذاتي
effective diffusion coefficient	معامل الانتشار الفعال
intrinsic carrier	الحاملات الذاتية
Activation energy	طاقة التنشيط
doping	التطعيم
Acceptor	الآخذة(ة)
donor	المانح(ة)

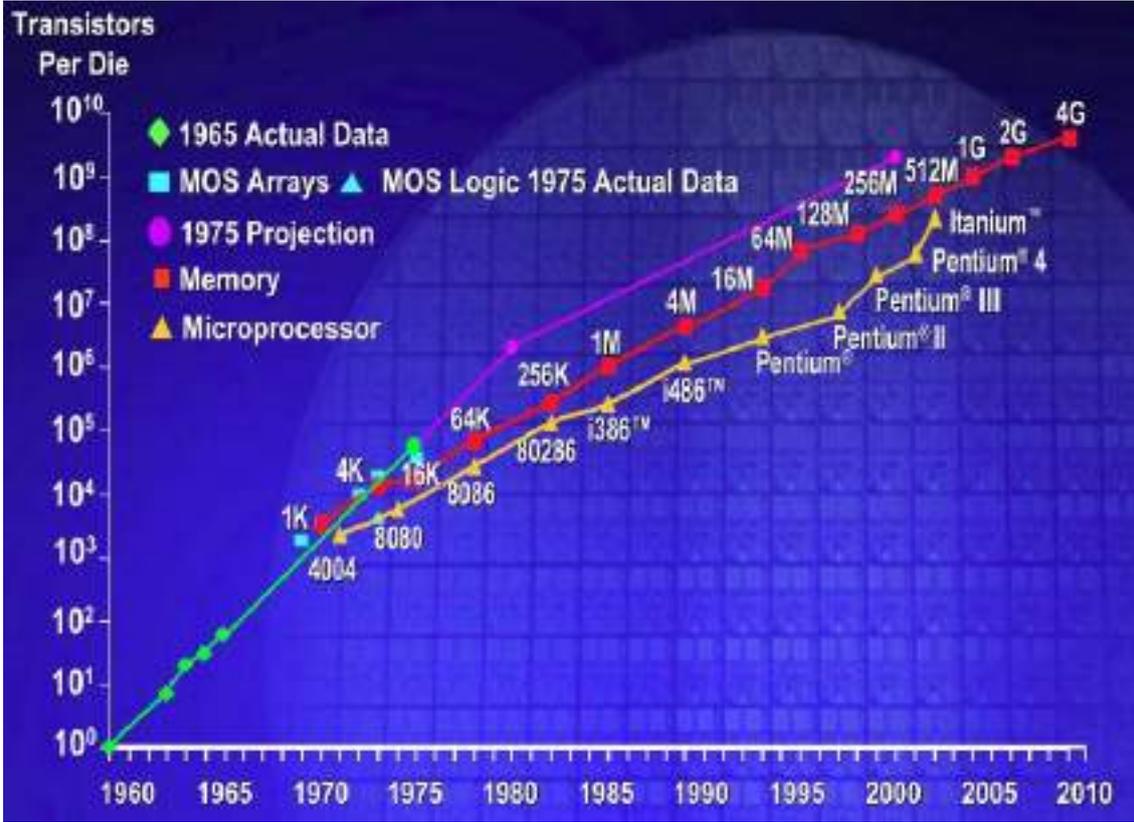
مقدمة

بعد التطور الكبير في مجال أنصافالنواقل (Semi-conductors) ، و ظهور الدارات المتكاملة (Integrated Circuit-IC) في سنة 1958، ركز التقانيون اهتمامهم على ابتكار المركبات الالكترونية والالكترونية الضوئية الأصغر حجما، عن طريق تصغير أبعادها. حيث عرف مجال صناعة هذه المركبات تسارعا كبيرا وهو ما يؤكد التزايد الأسّي حسب قانون مور Moore's law [1,2,3] لعدد الترانزستورات السيليكونية المستعملة في الرقاقات الالكترونية. في السنوات الأخيرة 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 لخصائص يتميز بها عن غيره من أنصاف النواقل، فأكسيده عازل مقبول لهذه المركبات ويعد السطح البيني له ذاتوعية، مما ييسر صناعتها وبالتالي انقاص تكلفتها. لكن مواصلة مواكبة لسيرورة التطور التكنولوجي في مجالي الاعلام والاتصال باتت تواجه صعوبة متزايدة مع كل جيل من التكنولوجيا، فأبي تحجيم هذه المركبات السيليكونية يجعل التيارات الطائعة من السطح البيني جد معتبرة، ولتخطي هذا الاشكال ومواصلة سيرورة التطور لهذه المكونات بزيادة تحجيمها 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 [4].

في هذا السياق أبحاث عدة عمدت الى ادخال مواد وبني جديدة تكون بديلة للسيليسيوم قصد مواكبة هذا التطور. حركية حاملات الشحنة المرتفعة وقصر الفاصل الطاقوي لدى الجيرمانيوم، جذدت الاهتمام بهذا النصف ناقل باعتباره مرشحا واعدت لتعويض السيليسيوم من أجل مواصلة تطوير هذه المكونات [4-10]. 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 بنوعيتها السالب والموجب في هذا النصف ناقل باعتبارها مفتاحا لتحقيق دارات نانومترية مطورة وجد فعالة.

في هذا الاطار سنخصص بالدراسة في هذه الأطروحة انتشار مطعومات النوع السالب حيث نتناول دراسة انتشار كل من الفسفور والأنتيموان (الأثمد) و الأرسونيك (الزرنخ) في الجيرمانيوم. هدفنا منها البحث



الشكل (1): يوضح التزايد الأسّي لعدد الترانزستورات في المعالج الدقيق، المصدر (www.intel.com)

عن كيفية ارتباط نسبة المساهمات لانتشار كل من المطاعم سالفة الذكر عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبا في الجيرمانيوم. ومن ثم استنتاج طاقات التنشيط لها عبر الفجوتين المساهمتين. وذلك من خلال نمذجة الانتشار بالآلية الفجوية، آخذين بعين الاعتبار ارتباط معامل الانتشار الفعال بنسبة المساهمات. ومحاكاة منحنيات الانتشار التجريبية للفسفور والأنتيموان والأرسونيك في الجيرمانيوم ببرنامج بلغة الفورترن. أتمنا ذلك وفق خطة بحث تضمنت مقدمة و أربعة فصول مع خاتمة للدراسة.

-الفصل الأول: تطرقنا فيه الى خواص الجيرمانيوم وفجواته المشحونة باعتبارها هي المسؤولة على انتشار الفسفور والأنتيموان والأرسونيك في الجيرمانيوم.

-الفصل الثاني : تضمن أنواع التطعيم وآليات الانتشار على المستوى الميكروسكوبي، كما تطرقنا في هذا الفصل الى دراسة نظرية لمعامل الانتشار ، ثم تطرقنا الى الجانب النظري للانتشار من خلال قانون فيك الأول والثاني.

-الفصل الثالث: بدأناه بإيجاد عبارة معامل الانتشار الفعال باعتبار انتشار الفسفور والأنتيموان والأرسونيك يتم بالثنائيات المشكلة بين الشوائب المطعمة المدروسة والفجوات المساهمة أو باعتبار الانتشار يتحقق بالتبادل البسيط. ثم قمنا بحل المعادلة التفاضلية الجزئية لقانون فيك الثاني بطريقة الفروق المتناهية. وتطرقنا الى البرنامج الذي أعدناه لمحاكاة المنحنيات التجريبية والتحقق من دقة الحلول العددية.

-الفصل الرابع: خصصناه لنتائج دراسة انتشار كل من الفسفور والأنتيموان والأرسونيك في الجيرمانيوم وتحليلها حالة بحالة ، حيث تضمن مقارنات بين المنحنيات التي تحصلنا عليها بالمحاكاة والمنحنيات التجريبية.

-الخاتمة: حوصلنا فيها نتائج دراستنا في هذه الأطروحة.

الفصل الأول:  
خواص الجيرمانيوم

## تمهيد

في هذا الفصل سنتطرق الى الجيرمانيوم و خصائصه المميزة له مثل الفاصل الطاقوي وحاملات الشحنة الذاتية له في حالته النقية، والى فجواته المشحونة المسؤولة على انتشار الفسفور والأنتيموان والأرسونيك في الجيرمانيوم.

## 1.1. تواجد الجيرمانيوم في الطبيعة

الجيرمانيوم هو عنصر شبه معدني نصف ناقل له لون بني مبيض الشكل (2). يقع في العمود الرابع من الجدول الدوري لمندليف، أسفل السيليسيوم مباشرة . يرمز له ب(Ge) وعدده الذري  $Z=32$  . و هو مزيج لـ 5 نظائر مستقرة وهي على الترتيب  $Ge^{74}$  نسبته 35.94%،  $Ge^{72}$ ، نسبته 27.66% ،  $Ge^{70}$  بنسبته 21.23% ،  $Ge^{73}$  نسبته 7.3% و  $Ge^{76}$  بنسبته 7.44%. اضافة الى ذلك هناك 33 نظير مشع لهم فترة نصف عمر تتراوح بين الملي من الثانية الى عدة أيام [13،15]. الجيرمانيوم لايتواجد نقيا في الطبيعة، وانما يتواجد ممزوجا بعناصر أخرى بشكل خامات كما في الجدول (1)، أغلبها متواجدة بأكرانيا وروسيا وأيضا الصين. تستغل هذه الخامات بغية الحصول منها على الجيرمانيوم [13،14].



الشكل (2): سبائك من الجيرمانيوم [14]

الجدول (1): أهم الخامات التي تحتوي على الجيرمانيوم

الخامات	نسبة احتوائها من الجيرمانيوم %
الاريرواديت $4Ag_2S - GeS_2$	6-7
الجيرمانيت $7CuS - FeS - GeS_2$	8.7
الكانفيلديت $Ag_8SnS_6$	1.8
الرينياريث مركب من $Cu, Fe, AS, Ge$	7.8

### 2.1. اكتشاف 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 استخراج 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 1949 [9,11,12,13,14].

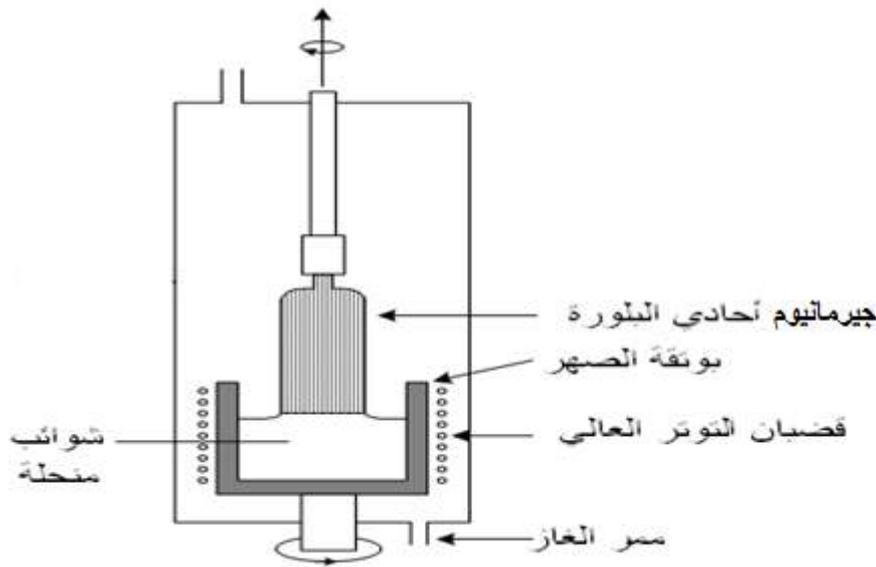


الشكل (3): أول ترانزستور في 1947 [11]

## 3.1. تنقية الجيرمانيوم

لتنقية الجيرمانيوم تستخدم طريقة (Czochralski) أو طريقة منطقة الذوبان حيث تمكنان من الحصول على سبائك جيرمانيوم أحادية البلورة وعالية النقاء.

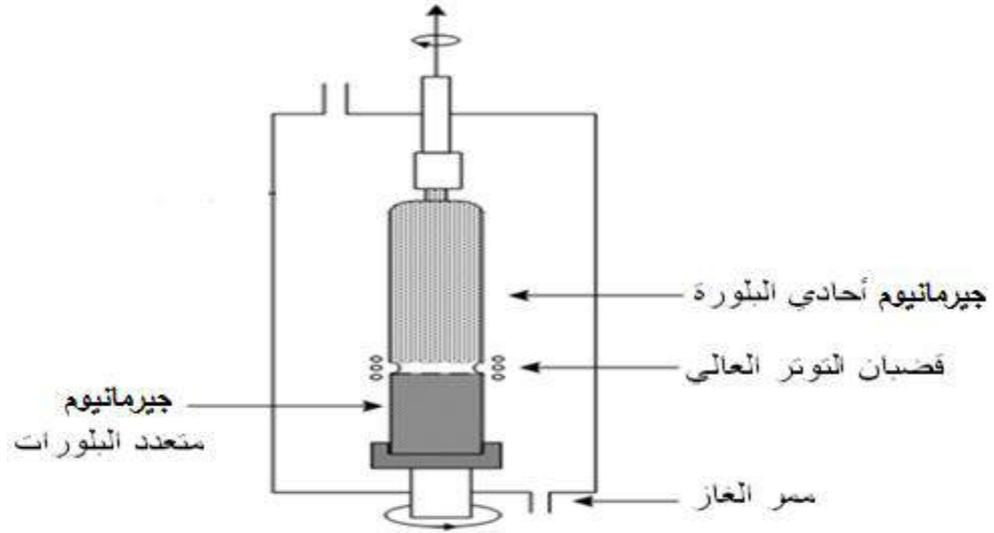
**طريقة (Czochralski):** في هذه الطريقة يتم صهر الجيرمانيوم في بوتقة داخل فرن. ثم يتم بعد ذلك سحب الجيرمانيوم أحادي البلورة انطلاقاً من الوسط ببطء، و سحب البلورات الأحادية يتم بالتزامن مع إبقاء البلورة في حالة دوران لتحقيق تجانس الحمام ومراقبة شكل السطح البيني صلب سائل.



الشكل (4): طريقة Czochralski

## - طريقة الصهر النطاقي (FZ) Flotter-Zone

تعتمد هذه الطريقة على الإذابة المحلية لسبيكة متعددة البلورات، وذلك بإنزالها رأسياً إلى الأسفل بسرعة بطيئة جداً وتمريها عبر لفائف تغذى بمولد للترددات العالية، حيث ترفع درجة حرارة منطقة السبيكة الموجودة داخل المحرض إلى ما فوق درجة الانصهار، الأمر الذي يؤدي إلى ذوبان هذه المنطقة. السبيكة تدار بسرعة ثابتة بغرض تفادي تقارب المادة في الوسط، ولجعلها تتوزع بانتظام نحو الخارج أثناء الانصهار. الشوائب الموجودة تنتشر نحو الأعلى الأمر الذي يمكن من حصول على سبيكة أحادية البلورة عالية النقاء [13،16].

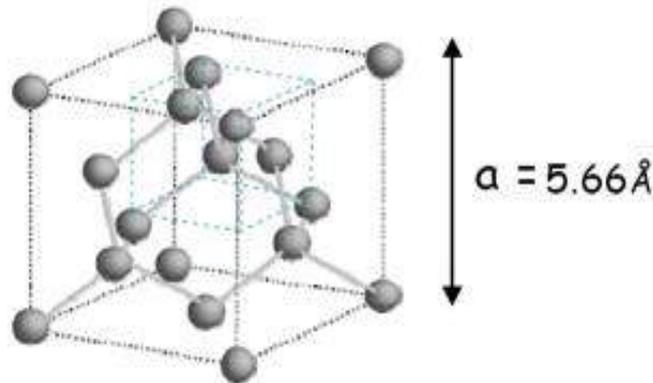


الشكل(5): يوضح طريقة منطقة الذوبان

#### 4.1. خواص الجيرمانيوم

##### 1.4.1 البنية البلورية

تنظم ذرات الجيرمانيوم في شبكة بلورية من نوع الألماس كما هو مبين في الشكل رقم 6. كل ذرة جيرمانيوم تحاط بأربع ذرات جوار أقرب مرتبطة مع بعضها بروابط تكافؤية. يمكن اعتبار هذه البنية بنيتين بلوريتين من نوع CFC، متداخلتين فيما بينهما ومزاحة الأولى عن الثانية بـ  $\left(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}\right)$  على طول القطر الرئيسي [13،17].



الشكل(6): البنية البلورية للجيرمانيوم

## 2.4.1 الفاصل الطاقوي

يتحدد الفاصل الطاقوي من خلال المنحنيات البيانية الممثلة لتغيرات الطاقة  $E$  للإلكترونات بدلالة شعاع الموجة  $k$ . تعتبر هذه المنحنيات المحدد الأساسي للخواص الفيزيائية للمواد فدرجة امتلاء أعلى عصابة طايقا والمسماة بعصابة النقل (BC) واحتمالية تطابقها مع العصابة الأدنى منها طايقا والمسماة بعصابة التكافؤ (BV) تحدد كون المادة ناقلة ، نصف ناقلة ،عازلة. في المواد العازلة وعند درجة  $0K$  تكون عصابة النقل فارغة تماما من الإلكترونات عكس عصابة التكافؤ التي تكون ممتلئة. تستمر هذه الخاصية في المواد العازلة حتى عند رفع درجة حرارتها وذلك لأن الطاقة الحرارية  $kT$  غير كافية لنقل الإلكترون من عصابة التكافؤ إلى عصابة النقل وجعله حرا وهذا راجع إلى كبر فاصل الطاقة  $E_g$  الفرق بين الطاقة الصغرى لـ BC والطاقة العظمى لـ BV [18]. في المواد النصف ناقلة يمكن للإثارة الحرارية أو الضوئية أن تجعل الإلكترونات تنتقل من عصابة التكافؤ إلى عصابة النقل ويعود ذلك لكون الفاصل الطاقوي صغيرا مقارنة بالعوازل. في الجيرمانيوم  $E_g = 0.66 eV$  عند  $300K$  كما هو موضح في الشكل (7) ، الأمر الذي يجعله قارئ جيد للإشارات التي أطوال موجاتها محصورة بين  $1.3-1.55\mu m$  ويؤمن بذلك الوساطة بين المكونات الإلكترونية الضوئية والميكروإلكترونية العاملة في هذا المجال من الاتصالات .

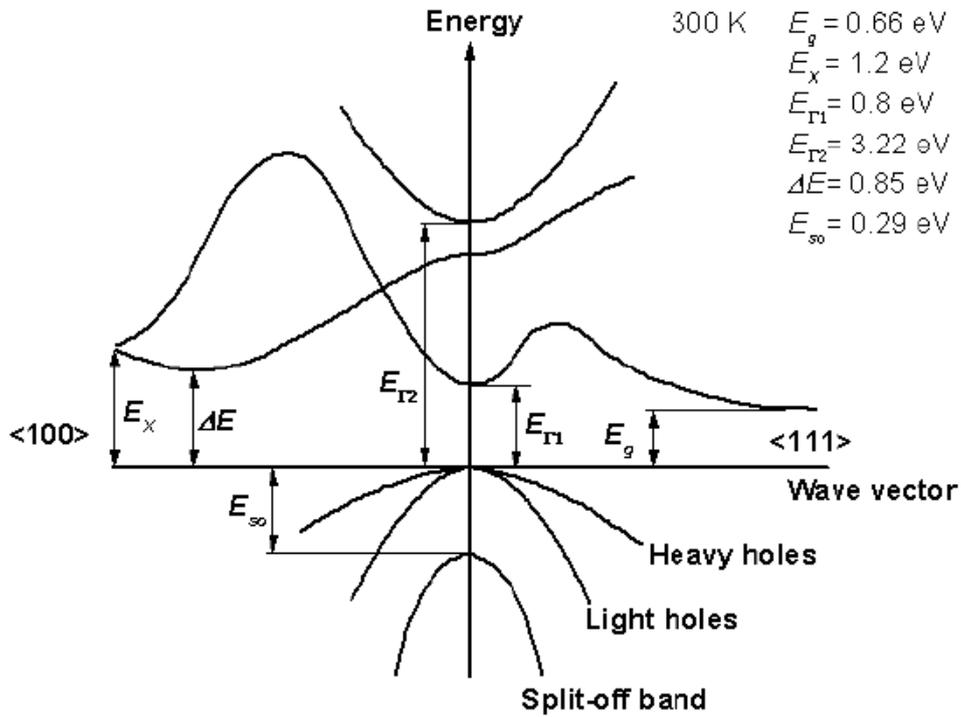
يتغير الفاصل الطاقوي للجيرمانيوم وفق العلاقة التالية [14،19]:

$$E_g (eV) = 0.742 - 4.8 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T + 235} \quad (1.1)$$

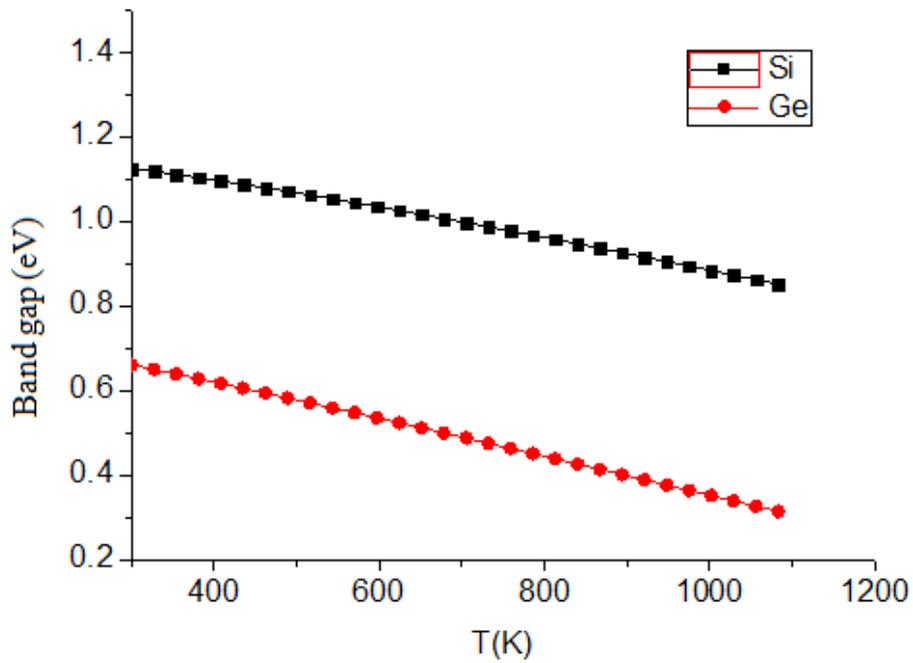
الشكل (8) يوضح مقارنة بين الفاصل الطاقوي للجيرمانيوم و الفاصل الطاقوي للسيليسيوم الذي يتغير وفق العلاقة التالية حسب المرجع [20]:

$$E_g (eV) = 1.17 - 4.73 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T + 663} \quad (2.1)$$

تشير  $T$  الى درجة الحرارة مقدره بالكلفن



الشكل (7): مخطط عصابات الطاقة للجيرمانيوم



الشكل (8): تغيرات الفاصل الطاقي للجيرمانيوم والسيليسيوم بدلالة درجة الحرارة

### 3.4.1 تركيز حاملات الشحنة

تصاحب عملية الإثارة الحرارية للإلكترونات من BV إلى BC عملية معاكسة تسمى الاتحاد. تنتقل الإلكترونات من BC إلى BV لتتحد مع الثقوب الحرة، مما يخفض من الناقلية. تتناسب احتمالية الاتحاد مع عدد الإلكترونات الحرة في BC ومع عدد الثقوب الحرة في BV، المتساويتان في حالة النصف ناقل النقي. ولكن توجد في درجة الحرارة T بين عمليتي الإثارة والاتحاد حالة توازن ينتج عنها تركيز معين لحاملات الشحنة [18].

في حالة التوازن الحراري تحدد الكثافة الكلية للإلكترونات في عصابة النقل والثقوب في عصابة التكافؤ وفق العبارات التالية [13,18,21,22,23]:

$$n = \frac{2}{h^3} (2\pi m_e K T)^{3/2} \exp\left[-\frac{E_c - E_f}{K T}\right] \quad (3.1)$$

$$p = \frac{2}{h^3} (2\pi m_h K T)^{3/2} \exp\left[-\frac{E_f - E_v}{K T}\right] \quad (4.1)$$

أين:  $E_c, E_f, E_v$  تمثل على الترتيب مستوى التكافؤ ومستوى فيرمي ومستوى النقل  $m_e, m_h$  الكتلة الفعالة للإلكترونات والثقوب.

ومن قانون فعل الكتلة نجد:

$$n \cdot p = n_i^2 \quad (5.1)$$

في المجال الذاتي يكون

$$n = p = n_i \quad (6.1)$$

و تكون عبارة تكميز حاملات الشحنة الذاتية كالتالي :

$$n_i = \sqrt{N_c \cdot N_v} \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right) \quad (7.1)$$

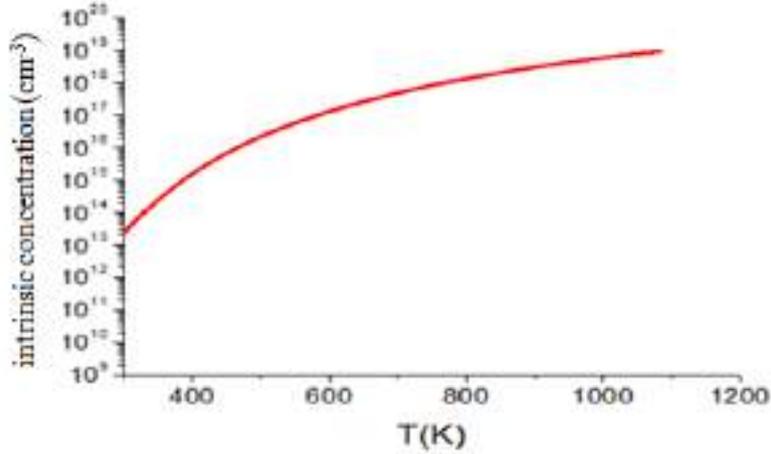
$N_c, N_v$  تمثلان على الترتيب الكثافة الفعالة للحالات للإلكترونات في عصابة النقل والكثافة الفعالة

للحالات للثقوب في عصابة التكافؤ.  $n_i$  كثافة حاملات الشحنة الذاتية في النصف ناقل النقي.

يوضح الشكل أدناه تغيرات كثافة حاملات الشحنة الذاتية عند مختلف درجات الحرارة للجيرمانيوم وفقا

للمرجع [24] الذي يقيمها بالعلاقة التالية:

$$n_i (\text{cm}^{-3}) = \sqrt{3.10 \times 10^{22} T^3 \exp\left(-\frac{0.785}{kT}\right)} \quad (8.1)$$



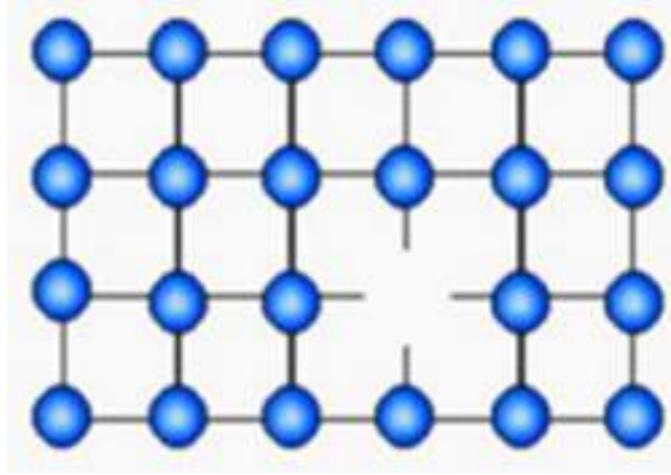
الشكل (9): تغيرات كثافة حاملات الشحنة للجيرمانيوم مع درجة الحرارة

الجدول (2): يلخص بعض خواص الجيرمانيوم

الخواص عند 300 K		Ge
عرض العصابة الممنوعة $E_g$ (eV)		0.67
تركيز الذرات $\text{atom}/\text{cm}^3$		$4.42 \cdot 10^{22}$
التركيز الذاتي لحاملات الشحنة ( $\text{cm}^3$ )		$2.4 \cdot 10^{13}$
حركية حاملات الشحنة ( $\text{cm}^2/\text{V.s}$ )	$\mu_e$	3900
	$\mu_p$	1900

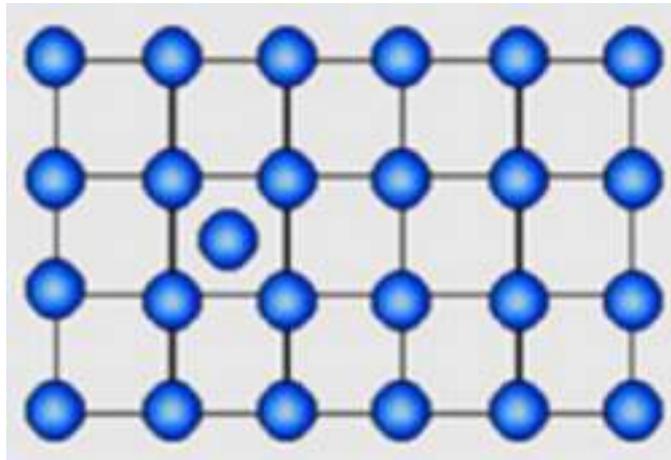
### 5.1 العيوب النقطية في الجيرمانيوم :

يعتبر وجود العيوب النقطية أمراً لا بد منه أثناء تبلور المادة. حيث نميز نوعين أساسيين من العيوب يلعبان الدور الرئيس في انتقال الشوائب داخل المنظومة البلورية للجيرمانيوم. الأول هو الفجوة (vacancy) والتي يرمز لها بالرمز V وتضهر نتيجة غياب ذرة جيرمانيوم عن موضعها في الشبكة البلورية المثالية.



الشكل(10): يوضح تواجد الفجوة داخل الشبكة البلورية

العيب الثاني يتمثل في البنية الذاتية (Self-interstitial) وهي عبارة عن ذرة جيرمانيوم منحرفة عن موضعها ومنغرس في موضع بيني من الشبكة البلورية للجيرمانيوم [20،25].



الشكل(11): يوضح تواجد البنية الذاتية داخل الشبكة البلورية

إن العيوب النقطية لها أهمية بالغة من وجهة النظر التكنولوجية والعلمية لدورها في تخفيف الشوائب على الانتشار. تلتقط الفجوة البنيات في الشبكة البلورية، والذرات في المواضع الاستبدالية يمكنها ان تحفز بواسطة حركة البنيات الذاتية. من هذا المنطلق زيادة تركيز هذه العيوب من شأنه أن يسرع عملية الانتشار وفق آليات سنستعرضها لاحقاً [26،27].

## 1.5.1 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 أصغرية. [26،27].

يؤدي ظهور n عيب نقطي الى تغير في الطاقة الحرة للبلورة بمقدار  $\Delta G$  حيث:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (9.1)$$

T درجة حرارة النظام ،  $\Delta H$  و  $\Delta S$  هما التغير في أنطالبي و أنطروبي النظام على التوالي الناتجين عن تكوين n عيب نقطي حيث:

$$\Delta H = n\Delta H_X^f \quad (10.1)$$

$$\Delta S = n\Delta S_X^f + \Delta S_C \quad (11.1)$$

$\Delta H_X^f$  و  $\Delta S_X^f$  هما على التوالي أنطالبي و أنطروبي تشكيل العيب النقطي X .  $\Delta S_C$  هي الأنطروبي التركيبية بالتعويض في العلاقة (9.1) نجد:

$$\Delta G = n\Delta H_X^f - nT\Delta S_X^f - T\Delta S_C \quad (12.1)$$

الطاقة الحرة  $\Delta G_X^f$  لتشكيل العيب النقطي هي

$$\Delta G_X^f = \Delta H_X^f - T\Delta S_X^f \quad (13.1)$$

عندئذ التغير في الطاقة الحرة يكتب على النحو التالي:

$$\Delta G = n\Delta G_X^f - T\Delta S_C \quad (14.1)$$

تحدد الأنطروبي التركيبية (Configurational Entropy) عدد الطرق المختلفة W التي يمكن بها توزيع ذرات البلورة على عدد المواقع المتاحة في الشبكة طبقا لعلاقة بولتزمان

$$\Delta S_C = k \ln W \quad (15.1)$$

حيث  $k$  ثابت بولتزمان.

عدد الطرق التي يمكننا بها تشكيل  $n$  عيب في بلورة تحتوي  $N$  موقع هو

$$W = \frac{N(N-1)\dots(N-n+1)}{n!} = \frac{N!}{(N-n)!n!} \quad (16.1)$$

بالتعويض نجد

$$\Delta G = n\Delta G_x^f - kT \ln \frac{N!}{(N-n)!n!} \quad (17.1)$$

باستخدام تقريب Stirling Approximation

$$\ln x! \simeq x \ln x - x \quad (18.1)$$

نجد مايلي

$$\ln \frac{N!}{(N-n)!n!} \simeq (N \ln N - N) - (N-n) \ln(N-n) + (N-n) - n \ln n + n \quad (19.1)$$

$$\ln \frac{N!}{(N-n)!n!} = N \ln N - (N-n) \ln(N-n) - n \ln n \quad (20.1)$$

عند التوازن التيرموديناميكي يكون

$$\frac{\partial \Delta G}{\partial n} = 0 \quad (21.1)$$

عندئذ نجد:

$$\ln \frac{N-n}{n} = \frac{\Delta G_x^f}{kT} \quad (22.1)$$

وبما أن  $n$  صغيرة جدا مقارنة بـ  $N$  فاننا نجد:

$$n = N \exp \left[ -\frac{\Delta G_x^f}{KT} \right] \quad (23.1)$$

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

$$c_x = c_s \exp\left[-\frac{\Delta G_x^f}{KT}\right] \quad (24.1)$$

حيث  $c_s$  كثافة المواقع في الشبكة البلورية.

$$c_x = c_s \exp\left[\frac{\Delta S_x^f}{KT}\right] \cdot \exp\left[-\frac{\Delta H_x^f}{KT}\right] \quad (25.1)$$

### 2.5.1 العيوب النقطية المشحونة

للعيوب النقطية عدة حالات شحنية. لها مستويات طاقة تتواجد داخل العصابة الممنوعة للنصف الناقل. ترتبط تراكيزها بتركيز العيب الغير مشحون  $c_{x0}$  ومستوى فيرمي.

تبين العلاقات أسفله التراكيز  $c_{x=}$  و  $c_{x-}$  للعيوب النقطية المشحونة  $x^-$  و  $x^=$  [25،20].

$$c_{x-} = \left(\frac{n}{n_i}\right) \exp\left[\frac{E_f - E_{x-}}{KT}\right] c_{x0} \quad (26.1)$$

$$c_{x=} = \left(\frac{n}{n_i}\right)^2 \exp\left[\frac{2E_f - E_{x-} - E_{x=}}{KT}\right] c_{x0} \quad (27.1)$$

$E_{x-}, E_{x=}$  المستويان الطاقويان داخل العصابة الممنوعة نتيجة تشكل  $x^-, x^=$  ونذكر أن العيب النقطي في هذه الحالة عبارة عن فجوة أوينية ذاتية.

تنشر المطعمات في الجيرمانيوم عن طريق هذه العيوب. يتم انتشارها بالآلية الفجوية أو البينية أو الاثنين معا. ينتشر الفسفور و الأنتيموان و الأرسونيك في الجيرمانيوم وفق الآلية الفجوية فقط [28،29،30،31،32،33].

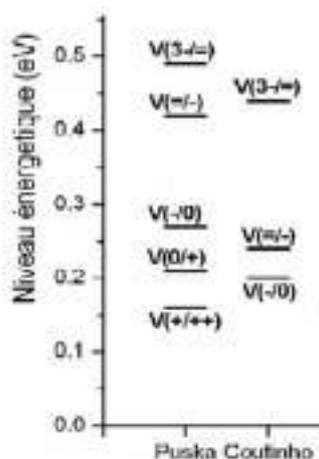
## 6.1 الحالات الشحنية لفجوات الجيرمانيوم

### 1.6.1 دراسات نظرية حول فجوات الجيرمانيوم

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

بالنسبة  $E_V+0.21\text{eV}$   $V(0/+)$  ،  $E_V+0.27\text{eV}$  لـ  $V(-/0)$  ،  $E_V+0.42\text{eV}$  بالنسبة  $V(2-/-)$  ،  
 $E_V+0.49\text{eV}$  لـ  $V(3-/2-)$  [36].

الدراسة الثانية كانت من طرف Coutinho في سنة 2005 حيث خلصت الى وجود أربع حالات شحنية لفجوات الجيرمانيوم ،بداية من الفجوة العديمة الشحنة الى الفجوة الثلاثية الشحنة السالبة،مستوياتها الطاقوية داخل العصابة الممنوعة للجيرمانيوم هي  $E_V+0.2\text{eV}$  بالنسبة لـ  $V(-/0)$  و  $E_C-0.42\text{eV}$  بالنسبة لـ  $V(2-/-)$  ،  $E_C-0.49\text{eV}$  بالنسبة  $V(3-/2-)$  كما هو مبين في الشكل أدناه [37].



الشكل(12):مستويات فجوات الجيرمانيوم المشحونة

### 2.6.1 دراسات نظرية حول المراكز E

المركز E هو عبارة عن ثنائية مشكلة من فجوة ومطعمة من عناصر العمود الخامس للجدول الدوري للعناصر لمندليف مثل الفسفور و الأنتيموان و الأرسونيك . توجد عدة دراسات حول هذه الثنائيات والتي يمكنها أن تعطي لمحة على فجوات الجيرمانيوم بمختلف حالاتها الشحنية. أنجز Janke دراستين حول انتشار الفسفور والمركب  $P_xV_y$  في الجيرمانيوم [38, 39]. المحاكاة التي أنجزها أظهرت جليا وجود المراكز  $PV, PV^+, PV^-, PV^{2-}$  . وبما أن الفسفور ذرة مانحة حيث الكترولها الخامس يكون متحررا فهي فعالة كهربائيا وحاملة لشحنة موجبة (+). تنتج هذه المراكز عن ارتباط بين  $P^+$  وفجوات حاملة لشحنات مختلفة (0،-،-2،-،-3).

### 3.6.1 دراسات تجريبية حول المراكز E

أجريت عدة دراسات تجريبية حول عينات من الجيرمانيوم مطعمة بالفسفور أو بالأنتيموان أو بالأرسونيك أو بالبيزموث. أخضعت هذه العينات الى اشعاعات الكترونية لتشكيل المراكز E في درجات حرارة منخفضة

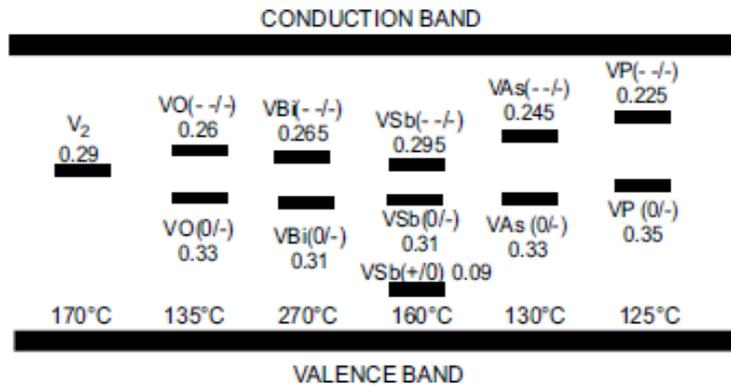
جدا، وذلك لتفادي تفككها. ثم أنجزت القياسات بواسطة التقنية Deep Level Transient Spectroscopy.

بينت الملاحظات التجريبية للمراكز E في هذه الدراسات أن أحد حالاتها الشحنة السالبة تكون ثنائية [37,36] Coutinho و Puska، مما يدعم الدراسات النظرية لـ [45-40,35,34] حول تواجد حالة لفجوة ثلاثية الشحنة السالبة اضافة الى الفجوات الأحادية والثنائية السالبتين. للفجوة ثلاثية الشحنة السالبة مستوى طاقي في أعلى العصابة الممنوعة للجيرمانيوم.

تساهم الفجوة ثلاثية الشحنة السالبة مع الفجوة ثنائية الشحنة السالبة في انتشار الفسفور و الأنيموان و الأرسونيك في الجيرمانيوم [28] ويكون تركيزهما كما يلي.

$$c_{V^-} = \left( \frac{n}{n_i} \right)^2 \exp \left[ \frac{2E_f - E_{V^-} - E_{V^=} }{KT} \right] c_{V^0} \quad (28.1)$$

$$c_{V^{3-}} = \left( \frac{n}{n_i} \right)^2 \exp \left[ \frac{3E_f - E_{V^-} - E_{V^{2-}} - E_{V^{3-}} }{KT} \right] c_{V^0} \quad (29.1)$$



الشكل (13): مأخوذ من المرجع . 34 يبين وجود حالات للمراكز E ثنائية الشحنة السالبة

في العصابة الممنوعة للجيرمانيوم

## خلاصة

الجيرمانيوم مادة نصف ناقلية. يتواجد في الطبيعة بشكل خامات. يتميز بفاصل طاقي قصير مقارنة بالسيليسيوم والذي يقدر بـ  $E_g = 0.66 \text{ eV}$  عند  $300\text{K}$ ، الأمر الذي يجعله قارئ جيد للإشارات التي أطوال موجاتها محصورة بين  $1.3-1.55 \mu\text{m}$  ويؤمن بذلك الوساطة بين المكونات الالكترونية الضوئية والميكروالالكترونية العاملة في هذا المجال من الاتصالات، كما أن حاملات الشحنة لديه مرتفعة مقارنة بالسيليسيوم مما يجعله مرشحا واعداد لتعويض السيليسيوم في المكونات الالكترونية والالكترونية الضوئية المطورة. بينت الدراسات النظرية والملاحظات التجريبية للمراكز  $E$  فيه أن أحد الحالات الشحنية لفجواته ثلاثية الشحنة . تساهم هذه الفجوة مع الفجوة الثنائية السالبة في انتشار الفسفور والأنثيموان والأرسونيك في الجيرمانيوم.

الفصل الثاني  
الجانب النظري للانتشار

## تمهيد

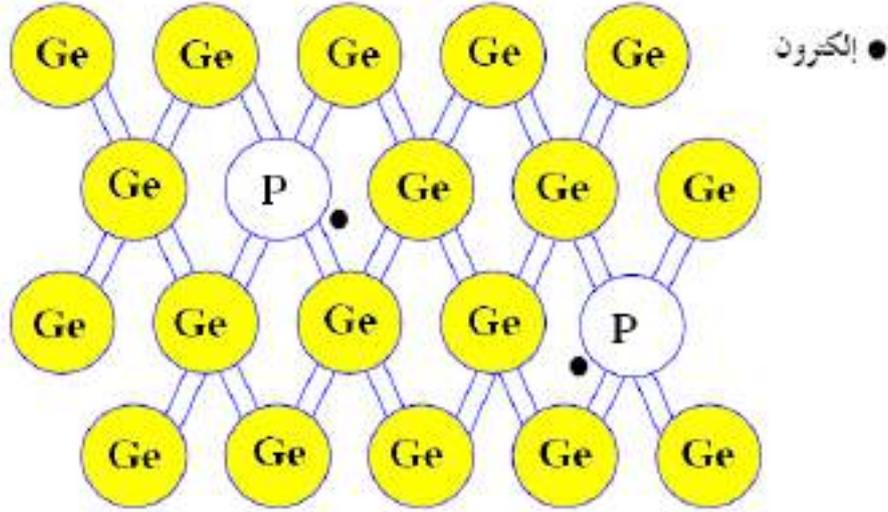
تكتسي عملية تطعيم أنصاف النواقل أهمية بالغة في عصرنا الحالي لما تلعبه من دور مهم في تكنولوجيا الصناعة الالكترونية والكهروضوئية. نسلط الضوء في هذا الفصل على أحد الطرق المستعملة في التطعيم والمتمثلة في الانتشار حيث سنتعرض الى آلياته. سنتطرق أيضا في هذا الفصل الى معامل الانتشار الذاتي دراسة نظرية ونتائج تجريبية خاصة بالفسفور والأنتيموان والأرسونيك تم استقاؤها من الأعمال المنشورة في هذا المجال. سنتعرض في الأخير الى قوانين الانتشار.

## 1.2 التطعيم

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 BC اكبر من تركيز الثقوب في عصابة التكافؤ BV أو تركيز الالكترونات في عصابة النقل BC أقل من تركيز الثقوب في عصابة التكافؤ BV ، وهذا حسب نوع التطعيم [18].

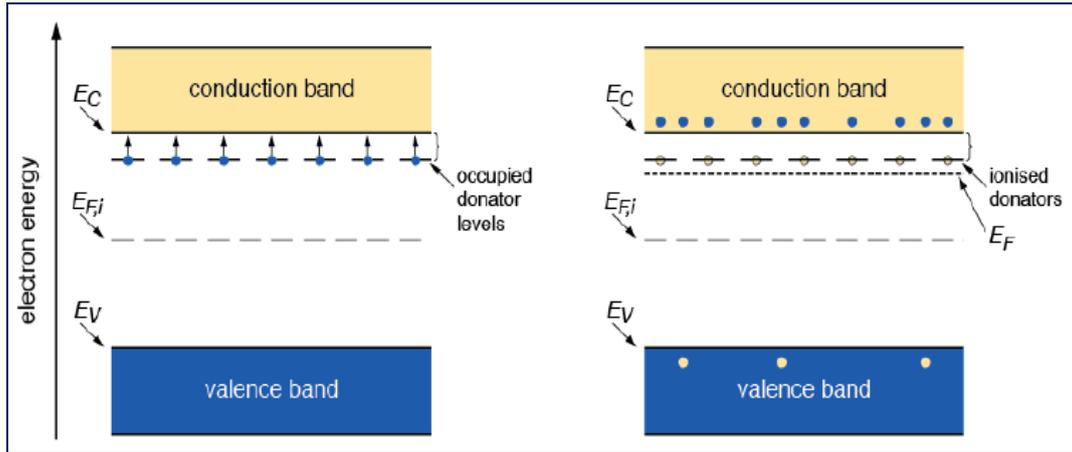
## 1.1.2 التطعيم من النوع N

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 Eg في الظروف الاعتيادية لكي تساهم في التوصيل. لا تكفي درجة حرارة المحيط لتوفير هذه الطاقة. عند إضافة مطعمة خماسية التكافؤ، من العناصر الموجودة في العمود الخامس من الجدول الدوري، والتي تسمى بالمطعمات المانحة مثل الأرسنيك As والفسفور P والانتيموان Sb، الى الشبكة البلورية للجيرمانيوم، سترتبط مع الشبكة بأربعة روابط تكافؤية ويبقى ارتباط الالكترون الخامس للمطعمة ضعيف بذرته كما في الشكل(14).



الشكل(14): يوضح التطعيم من النوع السالب وتحرر الاليكترون

ونتيجة لهذا الارتباط الضعيف فإن الطاقة اللازمة لفصله عن ذرته (طاقة التأين) ونقله حرا الى عصابة النقل تكون صغيرة أمام  $E_g$  (في حالة الجيرمانيوم المطعم بالفوسفور P طاقة التأين:  $e 0.012V$  و  $E_gV = 0.66e$ ). في هذه الحالة يكون مستوى طاقة المطعم المانحة P 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(15).



الشكل(15): يوضح مستوى المانحات المشغول بالالكترونات وانتقال هذه الالكترونات

إلى عصابة النقل بعد اثارها

عند K0 تكون كل الذرات غير متأينة أي أن مستويات المطعمات المانحة داخل العصابة الممنوعة مشغولة بالالكترونات. عند رفع درجة الحرارة (مثلا الى حدود K77) في حالة الفوسفور تتأين ذرات الشائبة أي ان الكترونها الخامس سينفصل عنها ويصبح حر في BC. والطاقة التأين لا تكفي لاثارة الالكترونات الذاتية من BV الى BC، وبالتالي يكون تركيز الالكترونات الناتجة عن المانحات في BC اكبر بكثير من الالكترونات الذاتية في هذه الحالة. يبين الجدول(3) طاقة التأين للفوسفور والأنتيموان والأرسونيك في الجيرمانيوم [13،18].

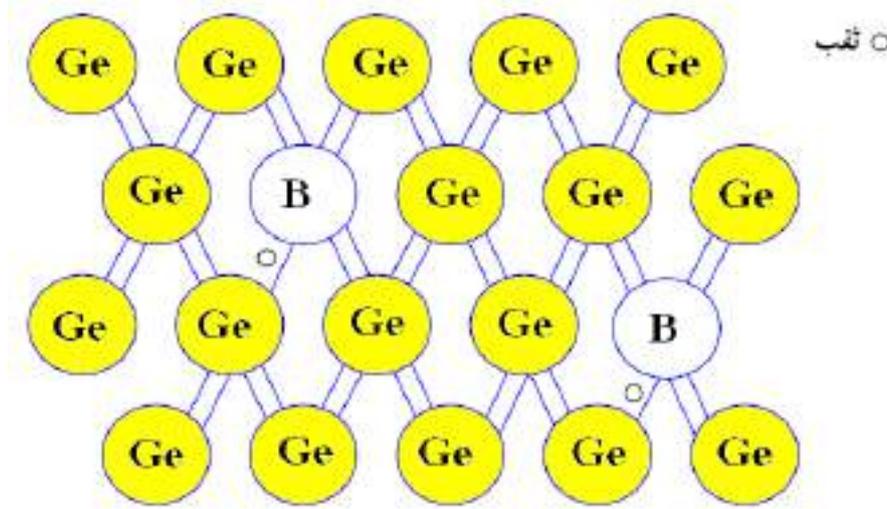
الجدول (3): بين قيم طاقة التأين مقدرة ب eV لبعض المطعمات المانحة

	P	As	Sb
طاقة التأين الجيرمانيوم	0.012	0.0127	0.096

تتواجد الالكترونات الناتجة عن المطعمات المانحة في BC بدون ثقوب مقابلة لها في BV ، لذلك يتحدد النقل اساسا في نصف الناقل بالالكترونات. يدعى نصف الناقل المطعم بعناصر العمود الخامس بنصف ناقل من النوع N [18] .

### 2.1.2 التطعيم من النوع p

بنفس الآلية تفهم عملية تطعيم الجيرمانيوم النقي بشوائب ثلاثية التكافؤ من عناصر العمود الثالث، والتي تسمى بالمطعمات الآخذة مثل البور B والألمنيوم Al والغالسيوم Ga والاندسيوم In. والمطعمة الآخذة أثناء تواجدها في محل ذرة الجيرمانيوم في شبكته البلورية ينقصها إلكترون واحد لكي يصبح لديها أربعة الكترونات خارجية تشكل بهم أربعة روابط تكافؤية مع الجوار الأقرب الأربعة . يتولد عن هذا النقصان ثقب في الرابطة التكافؤية ارتباطه بالمطعمة يكون ضعيف كما في الشكل (16). ونتيجة لهذا الارتباط الضعيف فإن طاقة فصله عن المطعمة الآخذة (طاقة التأين) ونقله حرا الى عصابة التكافؤ تكون صغيرة أمام Eg(في حالة الجيرمانيوم المطعم بالبور B طاقة التأين: 0.0104 eV). في هذه الحالة يكون مستوى طاقة المطعمة الآخذة B موجود في الفاصل الطاقوي قريب جدا من قمة عصابة التكافؤ.



الشكل (16): يوضح التطعيم من النوع الموجب وتحرر الثقب

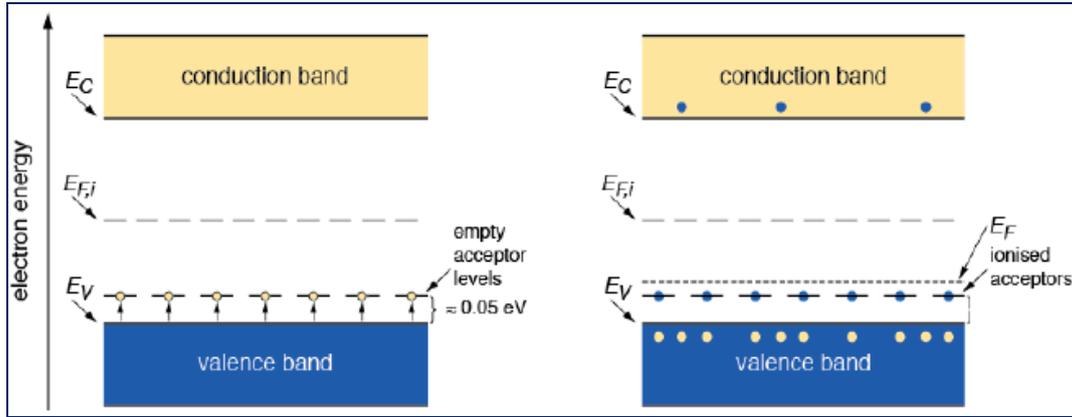
الجدول أدناه يبرز طاقة التأين لبعض الشوائب الآخذة في الجيرمانيوم.

الجدول (4): 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 المنوعة، 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 (17).

عند  $K_0$  تكون كل الذرات غير متأينة أي أن مستويات المطعمات الآخذة داخل العصابة المنوعة غير مشغول بالالكترونات. عند رفع درجة الحرارة تتأين ذرات المطعمة الآخذة أي ينتقل إلكترون من عصابة التكافؤ إلى مستوى الآخذات فيتحرر بذلك ثقب ناقل في  $BV$ . في هذه الحالة يزداد تركيز الثقوب في  $BV$  و يتحدد النقل اساسا في نصف الناقل بالثقوب. يدعى نصف الناقل المطعم بعناصر العمود الثالث بنصف ناقل من النوع (P) [18].



الشكل (17): يوضح المستويات الطاقوية للاأخذات داخل العصابة الممنوعة

## 2.2 طرق التطعيم:

هناك طريقتان هما الأكثر استعمالاً وشيوعاً مستخدمتان لتطعيم الجيرمانيوم هما الانتشار الحراري الذي ستقتصر الدراسة عليه والغرس الأيوني [13،46]

### 1.2.2 الغرس الأيوني (Ion implantation)

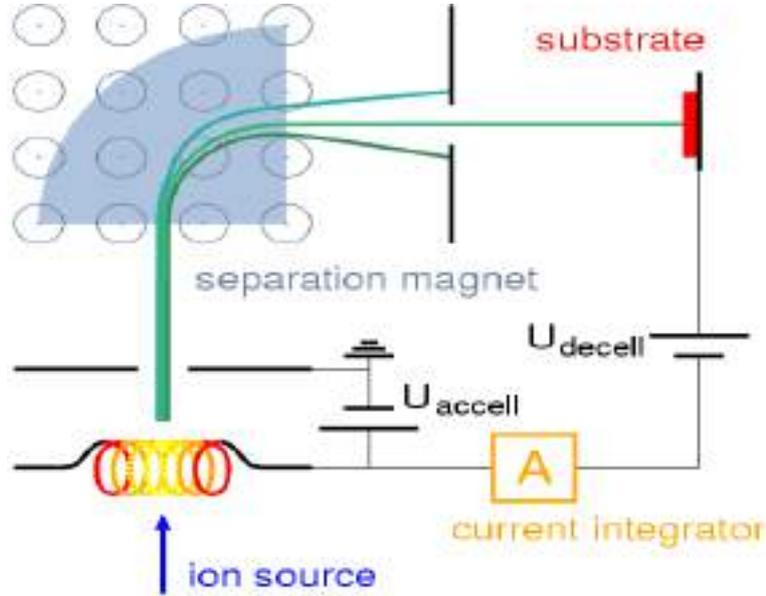
هي تقنية مستخدمة في علم المواد من أجل تغيير الخصائص الفيزيائية للأجسام الصلبة. تستخدم هذه العملية في تصنيع أنصاف النواقل وفي العديد من التطبيقات الأخرى للمواد. طور مبدأ غرس الأيونات كوسيلة من أجل إنتاج وصلات من النوع الموجب والسالب للمكونات الالكترونية والالكترونية الضوئية في أواخر سبعينات وأوائل ثمانينات القرن العشرين.

تعتمد هذه الطريقة على ادخال كمية محددة من الشوائب المطعمة عن طريق قذف العينة المراد تطعيمها بحزمة من الايونات مسرعة وموجهة بواسطة حقل كهرو- مغناطيسي.

يتم تسريع أيونات المطعمات المراد إضافتها في مجال كهربائي، وصدمة على سطح الجسم الصلب. تقوم الأيونات الصادمة بنقل الطاقة إلى إلكترونات وأنوية المادة الهدف، مما يسهم في حدوث تغيير في التركيب البنوي للمادة الصلبة نتيجة لحدوث سلسلة من التصادمات داخل المادة.

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 الحجرة 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، و إيقاف العملية عند مقدار الجرعة المرغوب فيها[63].



الشكل (18): مخطط يبرز آلية الغرس الأيوني

### 2.2.2 الانتشار:

نميز بين مجالين يمكن أن يحدث فيهما الانتشار هما:

- مجال الانتشار الذاتي: في هذا المجال تكون حاملات الشحنة الذاتية أكبر بكثير من تركيز

الشوائب ويكون  $n = n_i$

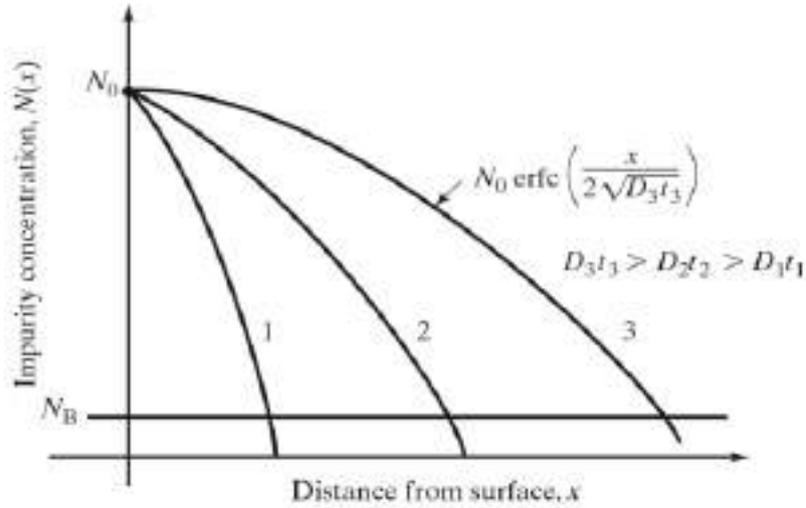
- مجال الانتشار اللاذاتي

في هذا المجال يكون تركيز الشوائب معتبر مقارنة بتركيز الحاملات الذاتية وهذا يحصل عندما تكون العينة

مشابة بقدر كبير [47].

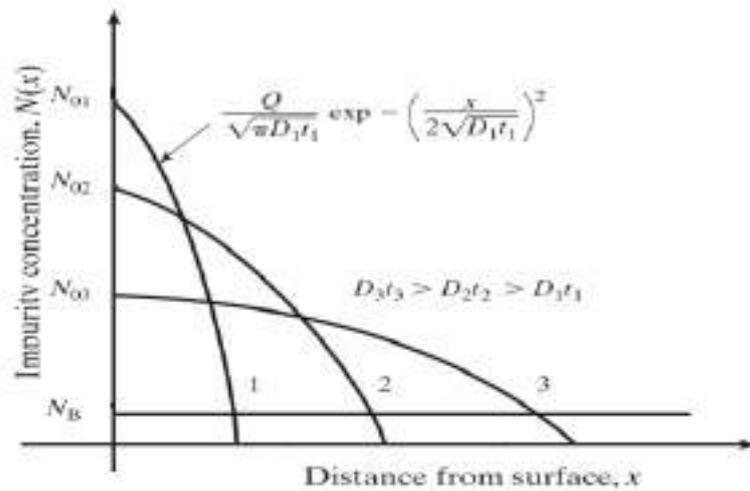
في التطبيق العملي يتم التطعيم وفق هذه الطريقة على مرحلتين:

التموضع-المسبق[46]: يتم ابقاء صفائح الجيرمانيوم في وسط مشبع بالشوائب المطعمة وبتركيز ثابت لمدة زمنية معينة وتحت درجة حرارة ثابتة. يحدث الانتشار في هذه الحالة على أعماق صغيرة مقارنة بسمك صفائح المادة النصف ناقلة. الشكل(19) يبين منحنيات الانتشار في الشروط الذاتية في حالة التوضع المسبق:



الشكل(19):منحنيات الانتشار الذاتي خلال مرحلة التوضع

مرحلة التوزع:يقطع منبع الإشابة عن صفائح الجيرمانيوم ويتم اخضاعها الى درجات حرارة عالية لكي تصل الشوائب المطعمة الى عمق أكبر. تكون منحنيات الانتشار في الشروط الذاتية في حالة التوزع كما هو مبين في الشكل (20).

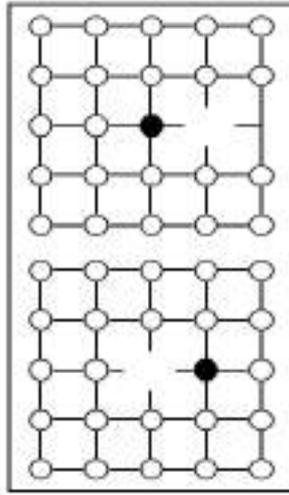
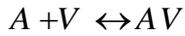


الشكل(20):منحنيات الانتشار الذاتي خلال مرحلة التوزع



- الآلية الفجوية (vacancy mechanism):

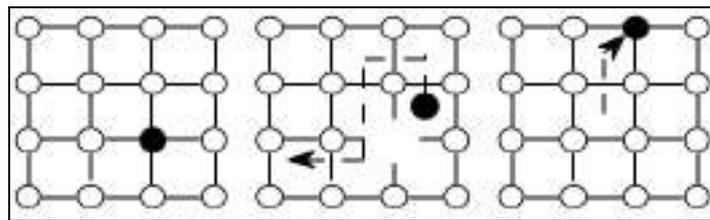
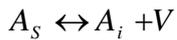
بوجود فجوة في أحد مواضع الجوار الأقرب تنتقل المطعمة المتواجدة في الموقع الاستبدالي الى موقع الفجوة المجاور. تعرف هذه الآلية بالتبادل البسيط. في حالة وجود قوة تجاذب بين المطعمة والفجوة يبقيان مرتبطين مع بعضهما البعض و يشكلان ثنائية فجوة-مطعمة. هذه الثنائية تنتقل كمركب واحد في الشبكة البلورية وهو ما يدعى بالانتشار بالثنائيات و يعبر عنه بالمعادلة التالية [48،53]:



الشكل(21):مخطط يبرز الآلية الفجوية

-آلية فرانك-تيرنبيل ( turnbull -Franck )

في هذه الآلية يتم انتقال الشائبة من موضع استبدالي الى موضع بيني مخلفة فجوة فتنتشر عبر المواقع البينية إلى أن تستقر في موضع استبدالي عند وجود فجوة. هذه الآلية يعبر عنها بالمعادلة التالية [53]



الشكل(22): يوضح آلية ( turnbull -Franck )

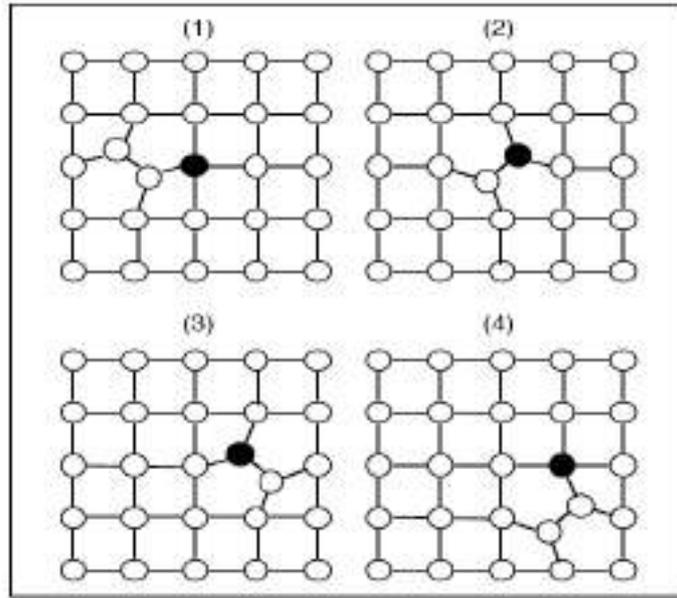
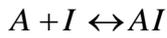
## 2.4.2 الانتشار البيئي :

يتحقق هذا النوع من الانتشار بواسطة المواقع البينية في الشبكة البلورية ويتم وفق آليات مختلفة نذكر نوعين منه

## -الانتشار المحفز بالبنيات الذاتية (Self-interstitials)

بوجود بينية ذاتية في أحد مواضع الجوار الأقرب تنتقل المطعمة المتواجدة في الموقع الاستبدالي الى موقع بيني مجاور للبينية الذاتية. و بسبب وجود قوة التجاذب بينهما يقيان مرتبطين مع بعضهما البعض و يشكلان ثنائية شائبة-بينية ذاتية. هذه الثنائية تنتقل كمركب واحد في الشبكة البلورية الشكل (23)

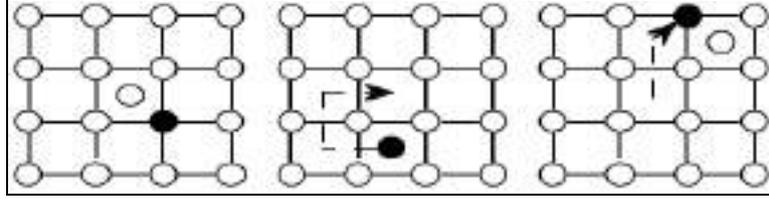
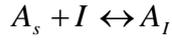
[41،50،51،59،60،61،62]. هذه الآلية يعبر عنها بالمعادلة التالية:



الشكل (23):آلية الانتشار وفق البنيات الذاتية

## - آلية kick-out

في هذه الآلية تزح البينية الذاتية الشائبة المطعمة من موقعها الاستبدالي وتنتقل مكانها فتؤدي بالشائبة الى موقع بيني. تنتقل المطعمة عبر المواقع البينية إلى أن تستقر في موضع استبدالي الشكل (24). يعبر عن هذه الآلية بالتفاعل التالي [53] [54].



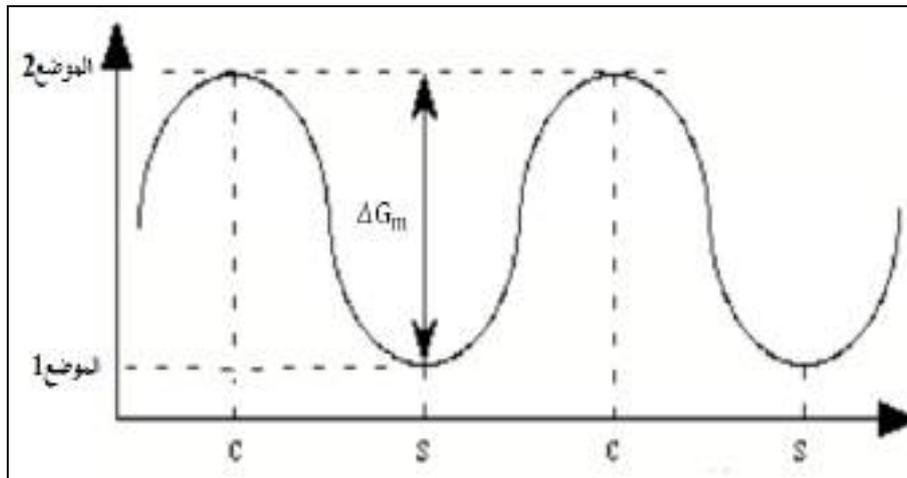
الشكل (24): آلية كيك-آوت

## 5.2 معامل الانتشار الذاتي :

هو المعامل المرتبط بحالة الانتشار في المجال الذاتي لأنصاف النواقل. يمكن اعتبار الانتشار ذاتي عندما يكون تركيز حاملات الشحنة  $n$  في نصف الناقل يساوي تقريبا تركيز حاملات الشحنة الذاتية  $n_i$ . في هذه الحالة تركيز المطعمة المنتشرة يكون مهمل مقارنة بتركيز حاملات الشحنة الذاتي  $n_i$ . يرتبط معامل الانتشار الذاتي بدرجة الحرارة ومعرفته ضرورية لوصف الانتشار في هذا المجال.

## 1.5.2 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 (25): الحاجز الكموني أثناء الانتقال من موضع الى آخر

هذا التغير يوافق حالة نشاط يمر بها الفرد تعبر  $\Delta G_m$  عن حالة النشاط قبل الوصول الى الموضع 2 ، كما أنها تمثل الطاقة اللازمة لاجتياز الحاجز للوصول الى الموضع 2 الشكل (25).

يرتبط معامل الانتشار في حالة كون الانتشار يكون محفزا بالفجوات أو البنيات الذاتية ، بتواتر القفز  $\nu$  بالعلاقة التالية [25،47،55،56]:

$$D = f \cdot \frac{1}{6} a^2 \cdot \nu \quad (1.2)$$

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

$$\nu = \nu_x \cdot P_x \quad (2.2)$$

حيث تمثل  $\nu_x$  تواتر القفز للعيب النقطي وتساوي :

$$\nu_x = \nu_0 \exp \left[ -\frac{\Delta G_x^m}{KT} \right] \quad (3.2)$$

وتمثل  $P_x$  احتمال وجود عيب نقطي في الموضع المجاور وتساوي:

$$P_x = Z \cdot \frac{C}{C_s} \exp \left[ -\frac{\Delta E_{AX}}{KT} \right] \quad (4.2)$$

في العلاقتين (3.2) و(4.2) تمثل:  $\Delta G_m$  طاقة هجرة العيب النقطي

$E_{AX}$  تمثل طاقة الارتباط بين الفرد المنتشر والعيب النقطي

$C$  تركيز العيب النقطي عند التوازن التيرموديناميكي

$C_s$  كثافة المواقع في الشبكة البلورية

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

بتعويض  $C$  انطلاقا من العلاقة (24.1) نحصل على مايلي:

$$\nu = z \nu_0 \exp \left[ -\frac{\Delta G_x^m}{KT} \right] \cdot \exp \left[ -\frac{\Delta G_x^f - E_{AX}}{KT} \right] \quad (5.2)$$

$$\nu = z \nu_0 \exp \left[ -\frac{\Delta G_x^f + \Delta G_x^m - E_{AX}}{KT} \right] \quad (6.2)$$

وبالتالي معامل الانتشار يكتب على النحو التالي:

$$D = f \cdot \frac{4}{6} a^2 \cdot \nu_0 \exp \left[ -\frac{\Delta G_x^f + \Delta G_x^m - E_{AX}}{KT} \right] \quad (7.2)$$

$$D = f \cdot \frac{4}{6} a^2 \cdot \nu_0 \exp \left[ -\frac{\Delta S_x^f + \Delta S_x^m}{T} \right] \exp \left[ -\frac{\Delta H_x^f + \Delta H_x^m - E_{AX}}{KT} \right] \quad (8.2)$$

في العلاقة (8.2) 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 :

$$D = D_0 \exp \left[ -\frac{E}{KT} \right] \quad (9.2)$$

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

$$E = \Delta H_x^f + \Delta H_x^m - E_{AX} \quad (10.2)$$

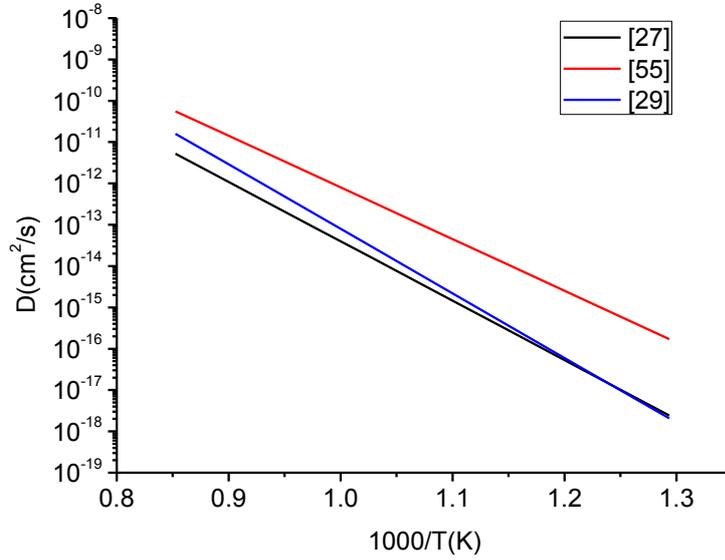
يمثل المنحنى البياني الممثل لتغيرات  $\log D = f \left( \frac{1}{T} \right)$  خطا مستقيم ميله  $-k/E$  ونقطة تقاطعه مع محور

الترتيب تمثل  $\log D_0$ .

## 6.2 دراسات حول معامل الانتشار في الجيرمانيوم:

هناك عدة دراسات تناولت البحث عن كيفية تغير معامل الانتشار في الجيرمانيوم بدلالة درجة الحرارة للعديد من الشوائب. تستنتج طاقة التنشيط  $E$  والحد الأنطروي  $D_0$  بالعلاقة (9.2). في هذه الفقرة، نستعرض حالة بحالة لطاقات التنشيط و الحد الأنطروي للفوسفور و الأنتيموان و الأرسونيك ، مع توضيح تغيرات معاملات انتشارها في الجيرمانيوم بدلالة مقلوب درجة الحرارة استنادا لبعض الدراسات.

### 1.6.2 حالة الفوسفور:



الشكل (26): يمثل تغيرات معامل انتشار P في الجيرمانيوم حسب المراجع المذكورة

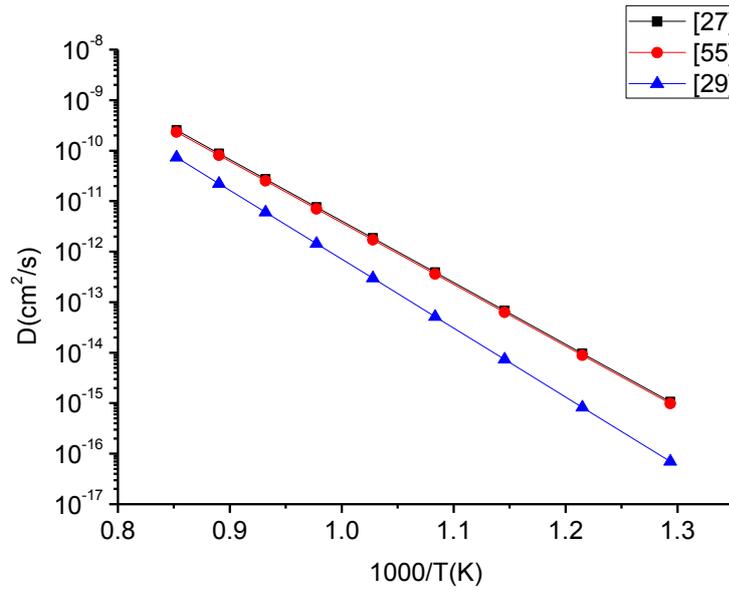
الجدول (6): قيم الحد الأنطروي ل p وطاقة التنشيط في الجيرمانيوم

المطعمة	$D_0(\text{cm}^2\text{s}^{-1})$	E(eV)	المراجع
P	2.5	2.48	[27]
P	330	2.13	[55]
P	9.1	2.85	[29]

### 2.6.2 حالة الارسونيك As

الجدول (7): قيم الحد الأنطروي ل As وطاقة التنشيط حسب في الجيرمانيوم

المطعمة	$D_0(\text{cm}^2\text{s}^{-1})$	E(eV)	المراجع
As	6.3	2.42	[27]
As	5.8	2.24	[55]
As	32	2.71	[29]

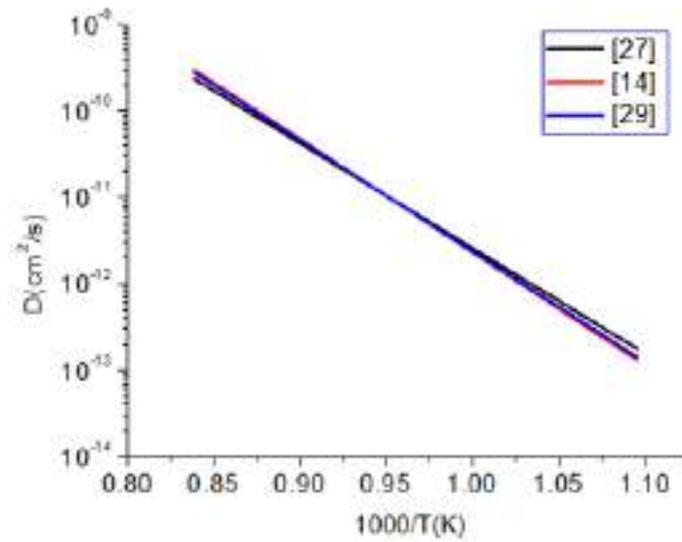


الشكل (27): يمثل تغيرات معامل انتشار As في الجيرمانيوم

### 3.6.2 حالة الأنتيموان

الجدول (8): قيم الحد الأنطروبي وطاقة التنشيط للآتمد

المطعمة	$D_0(\text{cm}^2\text{s}^{-1})$	$E(\text{eV})$	المرجع
Sb	4	2.42	[27]
Sb	28.5	2.598	[14]
Sb	16.7	2.55	[29]



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

المراجع المبينة

## 7.2 قوانين الانتشار:

## 1.7.2 القانون الأول لـ Fick :

في درجات الحرارة المنخفضة يمكن اعتبار منظومة بلورية معينة مستقرة والأفراد الموجودة بها ثابتة. عند ارتفاع درجة الحرارة وتحت تأثير الأرتجاج الحراري، ستتحرك هذه الأفراد وتنتقل داخل المنظومة البلورية وتختطع بالتالي إلى ظاهرة الانتشار، فتنقل المادة وفق الأتجاه الذي يؤدي إلى تساوي التركيز والجهد [25].

كتب فيك اولى معادلاته [25،52،53] في اطار المسلمة : يتناسب التدفق  $j$  للعنصر المنتشر مع تدرج

$$\text{تركيزه} \cdot \frac{\partial c}{\partial x}$$

تكتب معادلة FICK الأولى، ذات البعد الواحد، على النحو التالي

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (11.2)$$

حيث D معامل الانتشار

## التدفق في الحالة العامة:

فيما سبق اعتبرنا أن الفرد المنتشر ينتقل من موضع إلى آخر نتيجة تدرج التركيز (الانتقال من أعلى تركيز إلى أقل تركيز)، الآن سنهتم بالحالة الأعم أين الأفراد المنتشرة تخضع إلى قوى محركه مصدرها (تدرج التركيز، حقل إجهاد، حقل كهربائي....) حيث يكتسب الفرد المنتشر نتيجة هذه القوى المحركة سرعة متوسطة  $u$  ويكون التدفق في الحالة العامة بالشكل [25،57]:

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x} + uc \quad (12.2)$$

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

في حالة الفرد المنتشر مشحون، سينتج حقل كهربائي داخلي متحرض نتيجة لتدرج التركيز. في هذه الحالة تعطى قيمة  $u$  وفق العبارة التالية [25]

$$u = z \mu E \quad (13.2)$$

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

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

$$E = -\frac{kT}{q} \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (14.2)$$

تمثل  $n$  تركيز الالكترونات الحرة

من جهة ثانية حسب علاقة اينشتاين [58]:

$$\mu = \frac{qD}{kT} \quad (15.2)$$

بالتعويض في عبارة  $j$  نجد:

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x} - zDc \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (16.2)$$

### 2.7.3 القانون الثاني ل فيك :

يطبق على الجمل المحفوضة أي التي لا يكون فيها اختفاء ولااستحداث للأفراد المنتشرة. القانون الثاني

لفيك يبين التطور الزمني لتركيز الفرد المنتشر ونحصل عليه بتطبيق معادلة الاستمرار [57]

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{\partial j}{\partial x} \quad (17.2)$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D \frac{\partial c}{\partial x} \right] \quad (18.2)$$

**خلاصة :** ان تطعيم الجيرمانيوم بعناصر العمود الثالث من الجدول الدوري ينتج عنه قطع نصف ناقلة من النوع الموجب بينما تطعيمها بعناصر العمود الخامس ينتج عنه قطع نصف ناقلة من النوع السالب. من الوسائل المهمة المستعملة في عملية التطعيم هو الانتشار ويتحقق ميكروسكوبيا بواسطة العيوب النقطية .

من خلال الدراسات التي تناولت معامل الانتشار لاحظنا أن هناك تباين في تقييمه وهذا راجع الى الاختلاف في طرق الاشابة وطريقة القياس ونقاوة البلور.

نظرا لكون المطعمة المشحونة تخضع الى حقل كهربائي داخلي ناتج عن تدرج التركيز فان عبارة التدفق في القانون الأول لفيك يضاف لها حد ثاني يتعلق بالحقل الكهربائي الداخلي. بتعويض عبارة التدفق في قانون فيك الأول في معادلة الاستمرار نحصل على القانون الثاني لفيك. حل هذه المعادلتين التفاضلية من الدرجة الثانية اللاحقة لا يكون عموما إلا عدديا.

الفصل الثالث

نمذجة ومحاكاة انتشار As,Sb,P في الجيرمانيوم

### -تمهيد

إن نمذجة الانتشار يعتمد بالأساس على إيجاد عبارة معامل الانتشار الفعال ومن ثم تعويضها في معادلة القانون الثاني لـ Fick. في هذا الفصل نمذجا انتشار الفسفور والأنتيموان والأرسونيك في الجيرمانيوم بالآلية الفجوية، آخذين بعين الاعتبار أن فجوات الجيرمانيوم الحاملة للشحنات -2 و-3 هي التي تساهم في انتشار هذه المطعمات. أبرزنا في هذه النمذجة ارتباط معامل الانتشار الفعال بنسبة المساهمات. في بداية الفصل قمنا بإيجاد عبارة معامل الانتشار الفعال، باعتبار انتشار الفسفور و الأنتيموان و الأرسونيك يتم بالثنائيات المشكلة بين الشوائب المطعمة المدروسة والفجوات المساهمة، أو باعتبار الانتشار يتحقق بالتبادل البسيط. قمنا بعد ذلك بحل المعادلة التفاضلية الجزئية لقانون فيك الثاني بطريقة الفروق المتناهية. وتطرقنا الى البرنامج الذي أعدناه لمحاكاة المنحنيات التجريبية والتحقق من دقة الحلول العددية.

### 1.3 معامل الانتشار الفعال:

يتوزع الانتشار في النصف الناقل عبر مختلف العيوب النقطية. مجموع مساهمات هذه العيوب في معامل الانتشار يدعى بمعامل الانتشار الفعال. يتعلق هذا الأخير في المجال اللاذاتي، بتركيز الشائبة المطعمة وبدرجة الحرارة و يتعلق بدرجة الحرارة فقط في المجال الذاتي. تعتمد نمذجة الانتشار بالأساس على إيجاد عبارة معامل الانتشار الفعال. من الواضح من خلال الدراسات المنجزة في هذا المجال، أن مطعمات النوع السالب N تنتشر في الجيرمانيوم وفق آلية الفجوية [28-33]. يتحقق هذا الانتشار، على المستوى الميكروسكوبي، بالثنائيات أو بالتبادل البسيط. فيما يلي سنتطرق الى معامل الانتشار الفعال في الحالتين.

### 1.1.3 حالة الانتشار بالثنائيات:

إنطلاقا من العلاقة (16.2) فإن تدفق الثنائية ( مطعمة- فجوة) يمكن أن نعبّر عنه كمايلي:

$$j_{Ax} = -d \frac{\partial c_{Ax}}{\partial x} + z_{AX} d_{AX} c_{Ax} \frac{q}{kT} E \quad (1.3)$$

حيث d يمثل إنتشارية الثنائية AX والتي تحمل شحنة  $Z_{AX}$ ، الحقل الكهربائي نستطيع التعبير عنه بالشكل التالي

$$E = -\frac{kT}{q} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \ln \left( \frac{n}{n_i} \right) \right] \quad (2.3)$$

بالتعويض في المعادلة (1.4) نجد

$$j_{Ax} = -d \frac{\partial c_{Ax}}{\partial x} - z_{AX} d_{AX} c_{Ax} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \ln \left( \frac{n}{n_i} \right) \right] \quad (3.3)$$

لدينا أيضا انطلاقا من التفاعل بين المطعمة والفجوة والذي ينتج الثنائية AX حسب التفاعل التالي:



عند التوازن التيرموديناميكي وتطبيق قانون فعل الكتلة نحصل على مايلي

$$C_{AX} = k(T) C_{A^+} C_X \quad (4.3)$$

حيث  $C_{A_s} = C_{A^+}$  (المطعمة مائحة) ، باشتقاق المعادلة السابقة نجد

$$\frac{\partial c_{Ax}}{\partial x} = \frac{c_{Ax}}{c_{A^+}} \frac{\partial c_{A^+}}{\partial x} + \frac{c_{Ax}}{c_x} \frac{\partial c_x}{\partial x} \quad (5.3)$$

من ناحية أخرى نستنتج إنطلاقا من العلاقات (26.1) و(27.1) أن تركيز الفجوة X بمختلف شحناتها الممكنة في الشروط اللاذاتية يكتب على النحو التالي

$$c_{x^{-m}} = c_{x^{-m}}^i \left( \frac{n}{n_i} \right)^m \quad (6.3)$$

وهذا من أجل مختلف الشحنات الممكنة ل X أين  $c_{x^{-m}}^i$  يشير إلى التركيز في الشروط الذاتية ويشير  $C_{x^{-m}}$  إلى التركيز في الشروط اللاذاتية .

بنفس الطريقة يعبر عن تركيز الثنائية  $A^+X^{-m}$  كمايلي

$$c_{A^+x^{-m}} = c_{A^+x^{-m}}^i \left( \frac{n}{n_i} \right)^m \quad (7.3)$$

باستعمال النتيجة المبينة في العلاقة (7.3) يعبر عن تدرج  $C_{A^+X^{-m}}$  بما يلي

$$\frac{\partial c_{x^{-m}}}{\partial x} = m c_{x^{-m}}^i \left( \frac{n}{n_i} \right)^m \frac{\partial}{\partial x} \left[ \ln \left( \frac{n}{n_i} \right) \right] \quad (8.3)$$

ندخل النتيجة المتحصل عليها في المعادلة الخاصة بحساب تدفق الفرد المشحون  $A^+X^{-m}$  فنجد

$$j_{A^+x^{-m}} = -d_{A^+x^{-m}} \frac{c_{A^+x^{-m}}^i}{c_{A^+}} \left( \frac{n}{n_i} \right)^m \frac{\partial c_{A^+}}{\partial x} - m d_{A^+x^{-m}} c_{A^+x^{-m}}^i \left( \frac{n}{n_i} \right)^m \frac{\partial}{\partial x} \left[ \ln \left( \frac{n}{n_i} \right) \right] - z_{A^+x^{-m}} d_{A^+x^{-m}} c_{A^+x^{-m}}^i \left( \frac{n}{n_i} \right)^m \frac{\partial}{\partial x} \left[ \ln \left( \frac{n}{n_i} \right) \right] \quad (9.3)$$

ونتيجة لكون المطعمة المنتشرة  $A^+$  تحمل شحنة موجبة فإن

$$z_{A^+x^{-m}} = 1 - m \quad (10.3)$$

بإدخال العلاقة الأخيرة في عبارة التدفق نحصل على مايلي

$$j_{A^+x^{-m}} = -d_{A^+x^{-m}} \frac{c_{A^+x^{-m}}^i}{c_{A^+}} \left( \frac{n}{n_i} \right)^m \frac{\partial c_{A^+}}{\partial x} - d_{A^+x^{-m}} \frac{c_{A^+x^{-m}}^i}{c_{A^+}} \left( \frac{n}{n_i} \right)^m c_{A^+} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \ln \left( \frac{n}{n_i} \right) \right] \quad (11.3)$$

في الشروط الذاتية ( $n = n_i$ ) انطلاقا من المعادلة الأخيرة يكون

$$j_{A^+x^{-m}} = -d_{A^+x^{-m}} \frac{c_{A^+x^{-m}}^i}{c_{A^+}} \frac{\partial c_{A^+}}{\partial x} \quad (12.3)$$

وهي تمثل تدفق المطعمة A الناتج عن انتقال الثنائية  $A^+X^{-m}$  وبالتالي نستنتج انطلاقا من قانون فيك الأول أن معامل الانتشار الذاتي للمطعمة A وفق الفجوة المشحونة x بشكل ثنائية  $A^+X^{-m}$  يكتب على النحو التالي :

$$D_{A^+x^{-m}}^i = d_{A^+x^{-m}} \frac{c_{A^+x^{-m}}^i}{c_{A^+}} \quad (13.3)$$

وانطلاقا من هذا تكتب المعادلة (11.3) على النحو التالي

$$j_{A^+x^{-m}} = -D_{A^+x^{-m}}^i \left( \frac{n}{n_i} \right)^m \frac{\partial c_{A^+}}{\partial x} - D_{A^+x^{-m}}^i \left( \frac{n}{n_i} \right)^m c_{A^+} \frac{\partial}{\partial x} \left[ \ln \left( \frac{n}{n_i} \right) \right] \quad (14.3)$$

من ناحية ثانية وبتطبيق معادلة انحفاظ الشحنة في حالة المطعومات المانحة

$$c_{A^+} + p = n \quad (15.3)$$

و بتطبيق العلاقة  $p.n = n_i^2$  نجد:

$$n = \frac{1}{2} \left( c_{A^+} + \sqrt{c_{A^+}^2 + 4n_i^2} \right) \quad (16.3)$$

من العلاقة السابقة نستطيع أن نكتب مايلي

$$\frac{n}{n_i} = \frac{c_{A^+}}{2n_i} + \left[ \left( \frac{c_{A^+}}{2n_i} \right)^2 + 1 \right]^{1/2} \quad (17.3)$$

وباستعمال (17.3) نحسب  $\frac{\partial}{\partial x} \left[ \ln \left( \frac{n}{n_i} \right) \right]$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \ln \left( \frac{n}{n_i} \right) \right] = \frac{1}{2n_i} \left[ \left( \frac{c_{A^+}}{2n_i} \right)^2 + 1 \right]^{-1/2} \frac{\partial c_{A^+}}{\partial x} \quad (18.3)$$

بالتعويض في (14.3) نحصل على عبارة التدفق في شكلها الأخير

$$j_{A^+x^{-m}} = - \left[ 1 + \frac{c_{A^+}}{2n_i} \left[ \left( \frac{c_{A^+}}{2n_i} \right)^2 + 1 \right]^{-1/2} \right] D_{A^+x^{-m}}^i \left( \frac{n}{n_i} \right)^m \frac{\partial c_{A^+}}{\partial x} \quad (19.3)$$

$$j_{A^+x^{-m}} = -h D_{A^+x^{-m}}^i \left( \frac{n}{n_i} \right)^m \frac{\partial c_{A^+}}{\partial x} \quad (20.3)$$

حيث  $h$  يمثل معامل تسريع الحقل الكهربائي

$$h = 1 + \frac{c_{A^+}}{2n_i} \left[ \left( \frac{c_{A^+}}{2n_i} \right)^2 + 1 \right]^{-1/2} \quad (21.3)$$

في الأخير يكون تدفق المطعمة A يساوي مجموع تدفقات مختلف النوائيات

$$j_{A^+} = \sum j_{A^+x^m} \quad (22.3)$$

وعليه فإن معامل الانتشار الفعال للمطعمة المنتشرة يكتب على النحو التالي

$$D_A^{eff} = h \sum_m D_{A^+x^m}^i \left( \frac{n}{n_i} \right)^m \quad (23.3)$$

عادة ما يكتب معامل الانتشار الفعال للمطعمات المانحة اختصارا بالشكل التالي

$$D_A^{eff} = h \sum_m D^{m-} \left( \frac{n}{n_i} \right)^m \quad (24.3)$$

m- شحنة العيب النقطي X الذي يتم عبره الانتشار.

إذا أخذنا بعين الاعتبار مساهمة الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبا في هذا الانتشار فإن معامل

الانتشار الفعال يكتب على النحو التالي:

$$D^{eff} = h \cdot \left( D^{2-} \left( \frac{n}{n_i} \right)^2 + D^{3-} \left( \frac{n}{n_i} \right)^3 \right) \quad (25.3)$$

### 2.1.3 حالة الانتشار بالتبادل البسيط:

يكتب في هذه الحالة تدفق المطعمة المنتشرة على الشكل التالي:

$$J_{A^+} = -D_{A^+}^i \frac{\partial c_{A^+}}{\partial x} - D_{A^+}^i \frac{c_{A^+}}{n} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (26.3)$$

و معادلة انحفاظ الشحنة:

$$c_{A^+} + \frac{n_i^2}{n} = n \quad (27.3)$$

بعد اشتقاق (27.3) والتعويض في (26.3) نجد:

$$J_{A^+} = - \left( 1 + \frac{C}{2n_i} \left[ \left( \frac{C}{2n_i} \right)^2 + 1 \right]^{-1/2} \right) D_{A^+} \frac{\partial c_{A^+}}{\partial x} \quad (28.3)$$

بمأننا اعتبرنا الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبيًا هي التي تساهم في هذا الانتشار فإن معامل الانتشار يمكن كتابته كما يلي

$$D_{A^+} = D_{A^+}^{2-} + D_{A^+}^{3-} \quad (29.3)$$

$D_{A^+}^{2-}$  هو معامل الانتشار عبر فجوات الجيرمانيوم الحاملة للشحنة  $2-$ ،  $D_{A^+}^{3-}$  هو معامل الانتشار عبر فجوات الجيرمانيوم الحاملة للشحنة  $3-$ .

من التحليل النظري لمعامل الانتشار فإن هذا الأخير يرتبط مع تركيز الفجوة التي يتم من خلالها الانتشار. وبالتالي نستطيع أن نكتب:

$$D_{A^+} = k_1 c_{V^{2-}} + k_2 c_{V^{3-}} \quad (30.3)$$

$c_{V^{2-}}, c_{V^{3-}}$  هما على الترتيب تركيز فجوات الجيرمانيوم الحاملة للشحنة  $2-$  و تركيز فجوات الجيرمانيوم الحاملة للشحنة  $3-$ . حسب المعادلة (6.3) فإن تركيز  $c_{V^{2-}}, c_{V^{3-}}$  يكتبان بالشكل:

$$c_{V^{2-}} = c_{V^{2-}}^i \left( \frac{n}{n_i} \right)^2 \quad (31.3)$$

$$c_{V^{3-}} = c_{V^{3-}}^i \left( \frac{n}{n_i} \right)^3 \quad (32.3)$$

بالتعويض في العلاقة (30.3) نجد

$$D_{A^+} = k_1 c_{V^{2-}}^i \left( \frac{n}{n_i} \right)^2 + k_2 c_{V^{3-}}^i \left( \frac{n}{n_i} \right)^3 \quad (33.3)$$

من الدراسة النظرية لمعامل الانتشار فإن  $k_1 c_{V^{2-}}^i$  يمثل معامل الانتشار الذاتي عبر الفجوات الثنائية المشحونة سلبيًا  $D^{2-}$  و  $k_2 c_{V^{3-}}^i$  يمثل معامل الانتشار الذاتي عبر الفجوات الثلاثية المشحونة سلبيًا  $D^{3-}$  وعليه فإن معامل الانتشار يكتب بالشكل التالي:

$$D_{A^+} = D^{2-} \left( \frac{n}{n_i} \right)^2 + D^{3-} \left( \frac{n}{n_i} \right)^3 \quad (34.3)$$

وبتعويض  $D_{A^+}$  في المعادلة (28.3) نجد:

$$J_{A^+} = - \left( 1 + \frac{C}{2n_i} \left[ \left( \frac{C}{2n_i} \right)^2 + 1 \right]^{-1/2} \right) \left( D^{2-} \left( \frac{n}{n_i} \right)^2 + D^{3-} \left( \frac{n}{n_i} \right)^3 \right) \frac{\partial c_{A^+}}{\partial x} \quad (35.3)$$

وبالرجوع إلى قانون فيك الأول (11.2) وبالمطابقة فإن معامل الانتشار الذي يصبح في هذه الحالة معامل الانتشار الفعال يساوي:

$$D^{eff} = h \cdot \left( D^{2-} \left( \frac{n}{n_i} \right)^2 + D^{3-} \left( \frac{n}{n_i} \right)^3 \right) \quad (36.3)$$

نلاحظ أن العلاقة (36.3) تعبر عن الانتشار بالتبادل البسيط و عن الإنتشار بالثنائيات .

### 2.3 معامل انتشار مطعمات النوع السالب بدلالة نسبة المساهمات

ترتبط معاملات الانتشار الذاتي عبر الفجوات الثنائية المشحونة سلبا  $V^{2-}$  والذاتي عبر الفجوات الثلاثية المشحونة سلبا  $V^{3-}$  والذاتي،  $D^{2-}$  و  $D^{3-}$  و  $D^i$  على التوالي بالعلاقة التالية:

$$D^{2-} + D^{3-} = D^i \quad (37.3)$$

ويمكن كتابة:

$$D^{2-} = \frac{\beta}{1+\beta} \cdot D^i \quad (38.3)$$

$$D^{3-} = \frac{1}{1+\beta} \cdot D^i \quad (39.3)$$

حيث  $\beta$  هي نسبة المساهمات للانتشار عبر  $V^{2-}$  و  $V^{3-}$ ،  $\frac{D^{2-}}{D^{3-}}$

ويستعمل العلاقة (9.2) يمكن كتابة  $\beta$  على النحو التالي:

$$\beta = \beta_0 \exp \left[ -\frac{\delta g}{KT} \right] \quad (40.3)$$

$\delta g$  هو الفرق بين طاقتي التنشيط عن طريق الفجوات ثنائية الشحنة السالبة وثلاثية الشحنة السالبة،  $\beta_0$  معامل ضابط لنسبة المساهمات T. درجة الحرارة المطلقة (بالكلفن). k ثابت بولتزمان.

انطلاقاً من العلاقات السابقة، يمكن أن نعبر عن معامل الانتشار الفعال بالعلاقة التالية:

$$D^{eff} = \frac{h}{1+\beta} \left[ \beta \left( \frac{n}{n_i} \right)^2 + \left( \frac{n}{n_i} \right)^3 \right] D^i \quad (41.3)$$

حيث  $D^i$  و  $n_i$  يمثلان على الترتيب معامل الانتشار الذاتي وكثافة حاملات الشحنة الذاتية.

### 3.3 محاكاة عددية

#### 1.3.3 طريقة الحل العددي للقانون الثاني ل Fick:

على المستوى المجهرى، يمكن وصف الانتشار المنفرد لكل من الفسفور و الأنتيموان و الأرسونيك في الجيرمانيوم ضمن شروط التوازن وفي البعد الواحد ، بقانون Fick الثاني

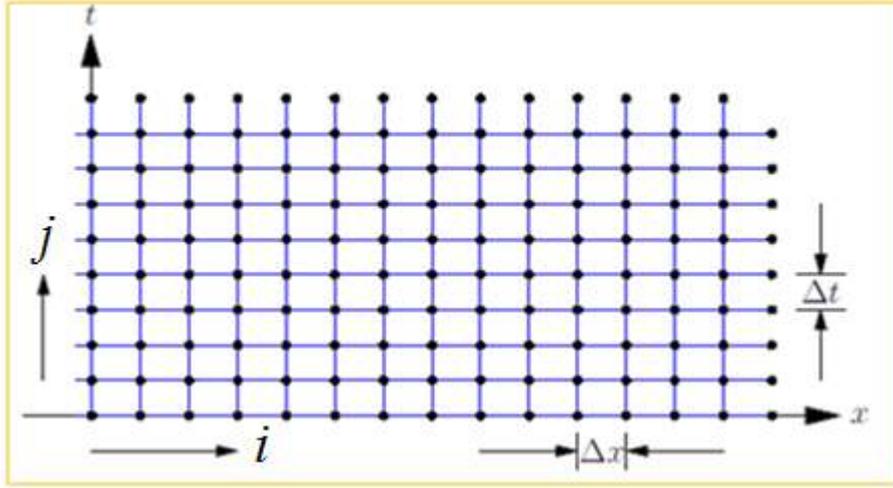
$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ D^{eff} \frac{\partial C}{\partial x} \right] \quad (42.3)$$

أو

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D^{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial C}{\partial x} \frac{\partial D^{eff}}{\partial x} \quad (43.3)$$

تمثل  $x$  المركبة البعدية و  $t$  تمثل الزمن.

عموما حل هذه المعادلة لا يكون إلا عددياً. قمنا بحل المعادلة (43.3) عددياً باستخدام تقريبات الفروق المتناهية، الطريقة المعروفة باسم ( Backward Euler). استقرار هذه الطريقة غير مشروط كما أن دقتها من الرتبة  $O(\Delta t, \Delta x^2)$ .



الشكل (29): يوضح تجزئة البعد وزمن الانتشار

جزأنا مجال الانتشار إلى N جزء متناهي السمك و عوضنا المشتقات الجزئية في المعادلة (43.3) بتقريبات الفروق المتناهية التالية (الشكل 29):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{c_i^j - c_i^{j-1}}{\Delta t} \quad (44.3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial x} = \frac{c_{i+1}^j - c_i^j}{\Delta x} \quad (45.3)$$

$$\frac{\partial D^{eff}}{\partial x} = \frac{[D^{eff}]_{i+1}^j - [D^{eff}]_i^j}{\Delta x} \quad (46.3)$$

$$D^{eff} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = [D^{eff}]_i^j \frac{c_{i-1}^j - 2c_i^j + c_{i+1}^j}{\Delta x^2} \quad (47.3)$$

حيث  $i$  ،  $j$  على الترتيب دليلا البعد والزمن.  $\Delta x$  و  $\Delta t$  هما على الترتيب الخطوة البعدية والخطوة الزمنية. انطلاقا من المعادلات (43.3)-(47.3) نحصل على المعادلة العامة والتي تربط التركيز في اللحظة  $j\Delta t$  بالتركيز في اللحظة  $(j-1)\Delta t$ :

$$c_i^{j-1} = -\delta_i^j c_{i-1}^j + [1 + \delta_i^j + \delta_{i+1}^j] c_i^j - \delta_{i+1}^j c_{i+1}^j \quad (48.3)$$

حيث :  $\delta_i^j = \delta_0 [D^{eff}]_i^j$

$$\delta_0 = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \text{ و}$$

### 2.3.3 الشروط الحدية:

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

$$c_0^j = c_1^j \quad (49.3)$$

$$c_N^j = c_{N+1}^j \quad (50.3)$$

انطلاقا من المعادلات (50,3)،(49,3)،(48,3) 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  $\mathbf{A} = \mathbf{B} \cdot \mathbf{C}$  حيث:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} c_1^{j-1} \\ c_2^{j-1} \\ \vdots \\ c_i^{j-1} \\ \vdots \\ c_N^{j-1} \end{bmatrix} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1^j \\ c_2^j \\ \vdots \\ c_i^j \\ \vdots \\ c_N^j \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1+\delta_2^j & -\delta_2^j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\delta_2^j & 1+\delta_2^j + \delta_3^j & -\delta_3^j & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & \ddots & & & & & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\delta_i^j & 1+\delta_i^j + \delta_{i+1}^j & -\delta_{i+1}^j & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & \ddots & & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\delta_N^j & 1+\delta_N^j \end{bmatrix}$$

## 4.3 محاكاة الانتشار:

لمحاكاة منحنيات انتشار الفسفور والأنتيموان والأرسونيك التجريبية عند مختلف درجات حرارة التلدين و مختلف الأزمنة ، أعدنا لذلك برنامج بلغة الفورترن والذي يعتمد على الحل العددي للنظام المصفوفي الثلاثي القطري الذي تحصلنا عليه، باستخدام خوارزمية توماس (Thomas Algorithm) ، والتي تقوم أساسا على طريقة التفكيك (LU decomposition Method).

اعتبرنا تركيز المطعمات على سطح عينة الجيرمانيوم ثابتا خلال الانتشار. تنتشر المطعمات في الجيرمانيوم وفقا للمعادلة (3،48) حيث الشروط الابتدائية:  $c_i^0=0(i=2,3,\dots,N)$  و  $c_j^{-1}=c_0(j=1,2,\dots,N_1)$  حيث  $N$  و  $N_1$  يمثلان على الترتيب العدد الكلي لخطوات البعد والعدد الكلي لخطوات الزمن.

معامل الانتشار الفعال، يتغير من لحظة إلى أخرى داخل مجال الانتشار، يجب إعادة حسابه في كل خطوة زمنية بسبب ارتباطه بتركيز المطعمة المنتشرة.

اخترنا قيم نسبة المساهمات  $\beta$  الموافقة لدرجة حرارة الانتشار التي تحقق تطابق منحنيات المحاكاة مع المنحنيات التجريبية. قيم معامل الانتشار الذاتي و تركيز حاملات الشحنة الذاتية الموافقة لدرجة حرارة الانتشار تم اختيارها وفقا للمرجع 29.

## 5.3 التحقق من دقة الحلول العددية

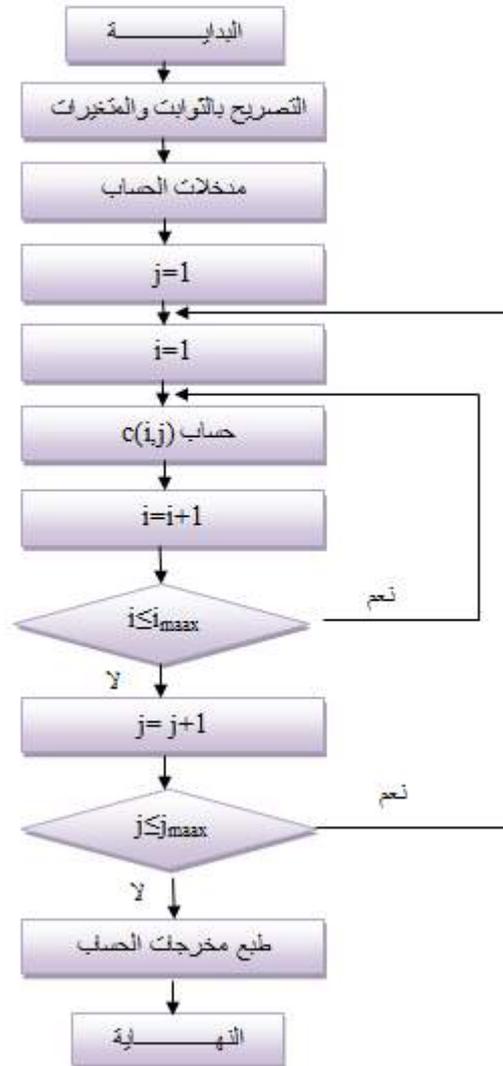
من أجل التحقق من دقة الحلول العددية قمنا بمقارنتها بالحلول الحقيقية التي يكون الحصول عليها ممكنا ضمن الشروط ، الانتشار ذاتي والتركيز السطحي ثابت، في هذه الشروط، الحلول الحقيقية نتحصل عليها من خلال الحل التحليلي لقانون Fick الثاني والذي يكون على النحو:

$$c(x,t)=c_0 \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{D^*t}}\right)$$

حيث  $\operatorname{erfc}$  هي متممة دالة الخطأ.

من أجل اختبار البرنامج في حالة الانتشار اللاذاتي قمنا بمقارنة بين المنحنى التجريبي لانتشار لاذاتي للفسفور في الجيرمانيوم ومنحنى المحاكاة .

-التخطيط البرمجي للبرنامج المنجز:



خلاصة

في هذا الفصل قمنا بنمذجة الانتشار وفق الآلية الفجوية ، آخذين بعين الاعتبار مساهمة الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبيًا في انتشار كل من الفسفور والأنتيموان والأرسونيك في الجيرمانيوم. نمذجنا معامل الانتشار الفعال وذلك بكتابة عبارته بنسبة المساهمات. ثم قمنا بحل المعادلة التفاضلية الجزئية لقانون فيك الثاني بطريقة الفروق المتناهية. وتطرقنا إلى البرنامج الذي أعدناه لمحاكاة المنحنيات التجريبية والتحقق من دقة الحلول العددية.

الفصل الرابع

نتائج ومناقشة

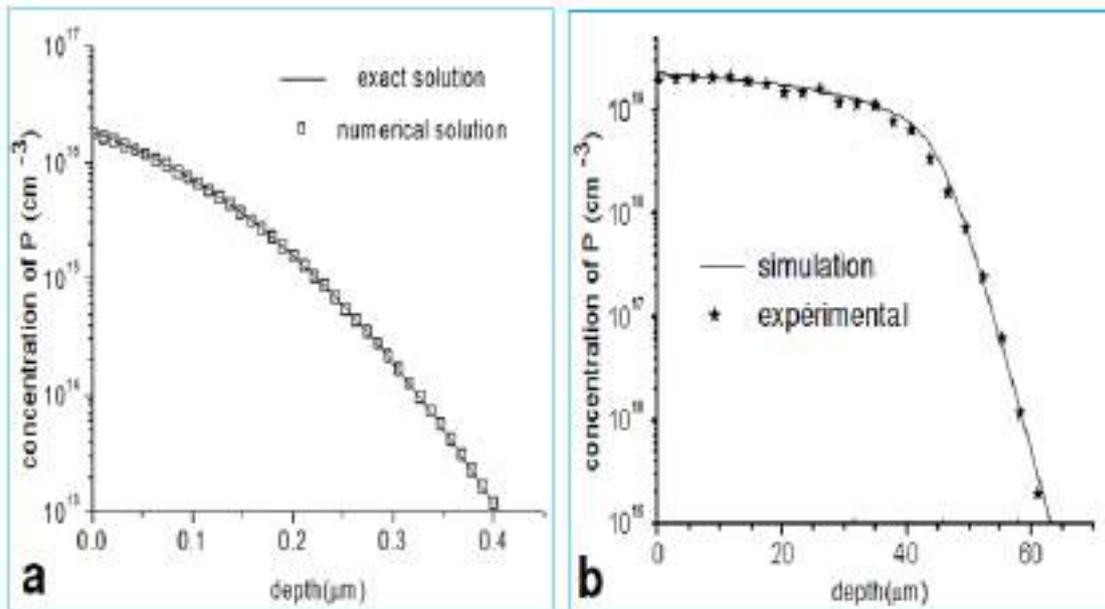
## تمهيد

في هذا الفصل نتطرق الى مقارنة بين الحلول العددية والحلول الحقيقية في حالة الانتشار الذاتي للفسفور في الجيرمانيوم، ومقارنة بين المنحنى التجريبي ومنحنى المحاكاة لانتشار لاذاتي للفسفور في الجيرمانيوم من أجل التحقق من دقة الحلول العددية واختبار البرنامج. نتعرض بعد ذلك الى نتائج دراسة انتشار كل من الفسفور والأنتيموان والأرسونيك في الجيرمانيوم التي تحصلنا عليها من محاكاة منحنيات الانتشار اللاذاتي التجريبية ومناقشتها حالة بحالة ، يعقبها ملخص لنتائج كل دراسة.

## 1.4 دقة الحلول العددية واختبار البرنامج

الشكل (a.30) يبين شبه التطابق بين الحلول العددية والحلول الحقيقية في حالة الانتشار الذاتي للفسفور، حيث معدل الأخطاء النسبية MRE يساوي 0.01 ، وأكبر خطأ نسبي هو 0.05 ، كما هو مبين في الجدول 9 .

الشكل ( b.30 ) يبين التقارب بين منحنى المحاكاة والمنحنى التجريبي لانتشار الفسفور في الجيرمانيوم. يتبين مما سبق أنه يمكن الاعتماد على هذا البرنامج لمحاكاة انتشار المطعمات في الجيرمانيوم.



الشكل (30): (a) مقارنة الحلول العددية مع الحقيقية في حالة انتشار ذاتي للفسفور

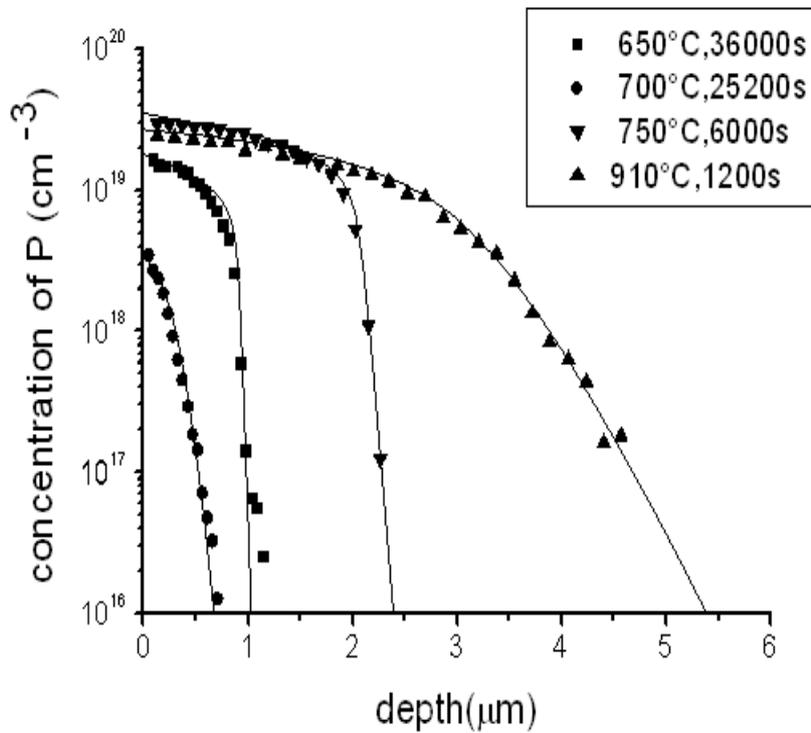
(b) مقارنة بين منحنى تحصلنا عليه بالمحاكاة ومنحنى تجريبي (المراجع [29])

الجدول (9): مقارنة الحلول التحليلية مع العددية من أجل انتشار ذاتي وتركيز سطحي ثابت

MRE	الخطا النسبي	الحل العددي	الحل التحليلي	x( $\mu\text{m}$ )
0.01	0.000742	1.66964E+16	1.670878E+16	0.0105
	0.000823	1.54188E+16	1.543149E+16	0.0210
	0.000813	1.41631E+16	1.417460E+16	0.0315
	0.000725	1.29383E+16	1.294773E+16	0.0420
	0.000567	1.17531E+16	1.175975E+16	0.0525
	0.000353	1.06149E+16	1.061869E+16	0.0630
	0.000089	9.53062E+15	9.531465E+15	0.0735
	0.000032	8.50571E+15	8.505438E+15	0.0840
	0.000366	7.54E+15	7.541887E+15	9.45E-02
	0.000733	6.65E+15	6.645726E+15	0.105
	0.001133	5.83E+15	5.818934E+15	0.1155
	0.001566	5.07E+15	5.062262E+15	0.126
	0.001799	4.38E+15	4.376349E+15	0.1365
	0.002294	3.77E+15	3.757617E+15	0.147
	0.002833	3.21E+15	3.204877E+15	0.1575
	0.003421	2.72E+15	2.715058E+15	0.168
	0.003786	2.29E+15	2.285113E+15	0.1785
	0.004486	1.92E+15	1.909565E+15	0.189
	0.005261	1.59E+15	1.584712E+15	0.1995
	0.006124	1.31E+15	1.305965E+15	0.21
	0.007085	1.08E+15	1.068702E+15	0.2205
	0.007821	8.75E+14	8.686582E+14	0.231
	0.009006	7.07E+14	7.008172E+14	0.2415
	0.010329	5.67E+14	5.613650E+14	0.252
	0.011803	4.52E+14	4.464302E+14	0.2625
	0.013446	3.57E+14	3.524622E+14	0.2730001
	0.014877	2.80E+14	2.763608E+14	0.2835001
	0.016891	2.19E+14	2.150290E+14	0.2940001
	0.019121	1.69E+14	1.660830E+14	0.3045001
	0.021586	1.30E+14	1.273349E+14	0.3150001
	0.024302	9.93E+13	9.690626E+13	0.3255001
	0.026829	7.52E+13	7.323538E+13	0.3360001
	0.030095	5.66E+13	5.491109E+13	0.3465001
	0.033671	4.22E+13	4.086469E+13	0.3570001
	0.037578	3.13E+13	3.018390E+13	0.3675001
	0.041836	2.31E+13	2.212750E+13	0.3780001
	0.045944	1.68E+13	1.610759E+13	0.3885001
	0.050965	1.22E+13	1.163124E+13	0.3990001

## 2.4 حالة انتشار الفسفور

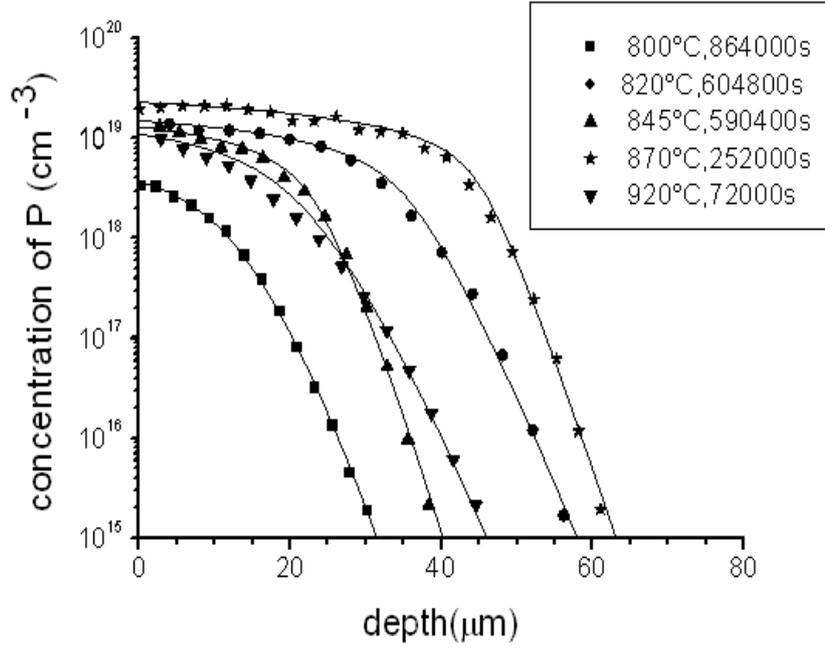
يوضح الشكل (31) و الشكل(32) منحنيات المحاكاة (الخطوط المستمرة) ،التي تحصلنا عليها، والمنحنيات التجريبية لانتشار الفسفور عند درجة حرارة تلدين معينة ومدة زمنية معينة. المنحنيات التجريبية مقاسة بواسطة SIMS (Secondary ion mass spectrometry) و SRP (spreading resistance profiling) . يبين الجدولين 10،11 المقادير المستعملة في المحاكاة. منحنيات المحاكاة تمثل أفضل ما تحصلنا عليه لانتشار الفسفور عبر الفجوات الثنائية  $V^{2-}$  والثلاثية  $V^{3-}$  المشحونة سلبا، حسب نسبة المساهمات المختارة.



الشكل(31): المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة (الخطوط المستمرة) والتجريبية (المرجع [29]) المقاسة بواسطة SIMS لانتشار الفسفور في الجيرمانيوم

الجدول (10): قيم التركيز الابتدائي على السطح، نسبة المساهمات  $\beta$  ، حاملات الشحنة الذاتية ومعامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة وأزمنة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم المستعملة في محاكاة المنحنيات التجريبية المحققة بواسطة ( SIMS )

المطعمة	$C_0$ (cm <sup>-3</sup> )	t(s)	T (°c)	$\beta$	$n_i$ (cm <sup>-3</sup> )	$D^i$ (cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
P	$1.8 \times 10^{19}$	36000	650	1.43	$3.68 \times 10^{18}$	$2.52 \times 10^{-15}$
P	$3.5 \times 10^{18}$	25200	700	2	$4.89 \times 10^{18}$	$0.85 \times 10^{-14}$
P	$3.5 \times 10^{19}$	6000	750	3.57	$6.67 \times 10^{18}$	$8.37 \times 10^{-14}$
P	$2.7 \times 10^{19}$	1200	910	10	$1.47 \times 10^{19}$	$6.56 \times 10^{-12}$



الشكل (32): المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة (الخطوط المستمرة) والتجريبية (المرجع [29]) المقاسة بواسطة SRP لانتشار الفسفور في الجيرمانيوم

الجدول (11): قيم التركيز الابتدائي على السطح، نسبة المساهمات  $\beta$ ، حاملات الشحنة الذاتية ومعامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة وأزمنة انتشار الفسفور في الجيرمانيوم المستعملة في محاكاة المنحنيات التجريبية المحققة بواسطة (SRP)

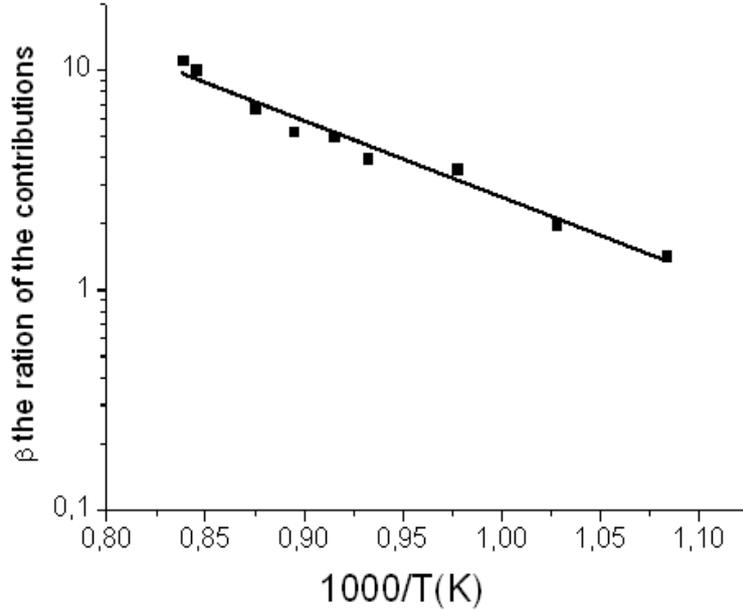
المطعمة	$C_0$ (cm <sup>-3</sup> )	t(s)	T (°C)	$\beta$	$n_i$ (cm <sup>-3</sup> )	$D^i$ (cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
P	$3.7 \times 10^{18}$	864000	800	4	$5.50 \times 10^{18}$	$3.78 \times 10^{-13}$
P	$1.3 \times 10^{19}$	604800	820	5	$6.37 \times 10^{18}$	$5.8 \times 10^{-13}$
P	$1.5 \times 10^{19}$	590400	845	5.26	$6.45 \times 10^{18}$	$1.14 \times 10^{-12}$
P	$2.3 \times 10^{19}$	252000	870	6.78	$6.67 \times 10^{18}$	$2.29 \times 10^{-12}$
P	$1.1 \times 10^{19}$	72000	920	11.11	$8.87 \times 10^{18}$	$7.8 \times 10^{-12}$

تطابق منحنيات المحاكاة ومنحنيات التجريب يؤكد مساهمة  $V^{3-}$  و  $V^{2-}$  في انتشار كل من الفسفور في الجيرمانيوم حسب قيم نسبة المساهمات  $\beta$  الموافقة لدرجات حرارة الانتشار المبينة في الجدولين (10)، (11).

يبين الشكل (33) تغيرات نسبة المساهمات  $\beta$  لانتشار الفسفور في الجيرمانيوم عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبيًا بدلالة مقلوب درجة الحرارة. تم الحصول على البيان انطلاقًا من معطياتنا المستعملة في المحاكاة. تتغير نسبة المساهمات بدرجة الحرارة وفقًا للمعادلة (40.3). تكتب المعادلة كالتالي:

$$\beta = 79.32 \times 10^2 \exp \left[ -\frac{(0.69)eV}{KT} \right] \quad (1.4)$$

0.69eV الفرق في طاقات التنشيط لانتشار الفسفور عبر الفجوتين المساهمتين..



الشكل(33):تغيرات نسبة المساهمات لانتشار الفسفور عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبا

في الجيرمانيوم بدلالة مقلوب درجة الحرارة

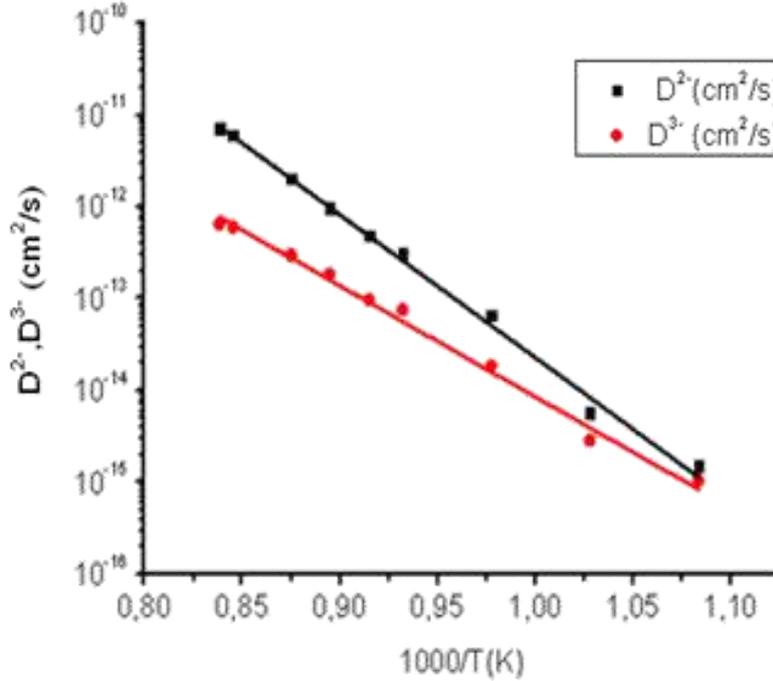
انطلاقا من المعادلات (38.3)، (39.3) وقيم  $\beta$  الموافقة لدرجات حرارة الانتشار المستعملة في المحاكاة والمبينة في الجدول(10) والجدول(11) نستنتج تغيرات معاملات الانتشار الذاتية  $D^3-$  و  $D^2-$  المبينة في الشكل(34).

ارتباط  $D^3-$  و  $D^2-$  بدرجة الحرارة بالنسبة للفسفور يكون على النحو التالي:

$$D^2 = 83.29 \exp \left[ -\frac{3.09eV}{KT} \right] (cm^2 s^{-1}) \quad (2.4)$$

$$D^3 = 1.05 \times 10^{-2} \exp \left[ -\frac{2.4eV}{KT} \right] (cm^2 s^{-1}) \quad (3.4)$$

حيث طاقات التنشيط لانتشار الفسفور عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبيًا في الجيرمانيوم هي على الترتيب 3.09 eV، 2.4 eV.



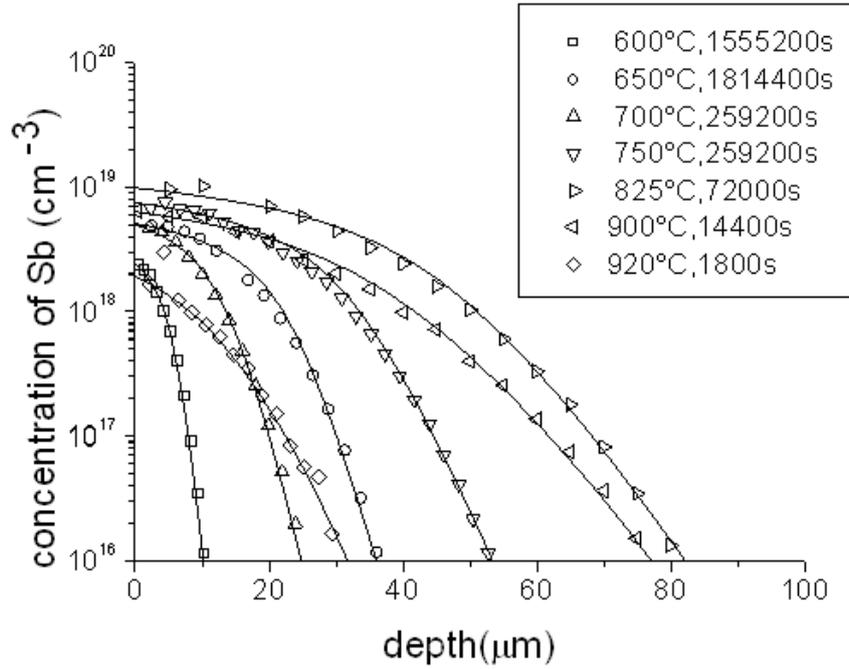
الشكل (34): تغيرات معاملات الانتشار الذاتية للفسفور عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبيًا في الجيرمانيوم بدلالة مقلوب درجة الحرارة

#### 1.2.4 خلاصة نتائج انتشار الفسفور :

انتشار الفسفور في الجيرمانيوم يتم بالآلية الفجوية، وذلك بمساهمة فجوات الجيرمانيوم الحاملة للشحنات 2- و 3-، حيث نسبة المساهمات ترتبط بدرجة الحرارة نتيجة الفرق في طاقات التنشيط عبر الفجوتين المساهمتين والذي يقدر ب 0.69eV. نسبة المساهمات لانتشار الفسفور من خلال الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبيًا في الجيرمانيوم المحددة من تحليلنا لانتشاره في الجيرمانيوم تعطى حسب المعادلة (1.4). ارتباط  $D^{3-}$  و  $D^{2-}$  بدرجة الحرارة بالنسبة للفسفور يكون حسب المعادلتين، (2.4)، (3.4) على الترتيب .

## 3.4 حالة الأنتيموان

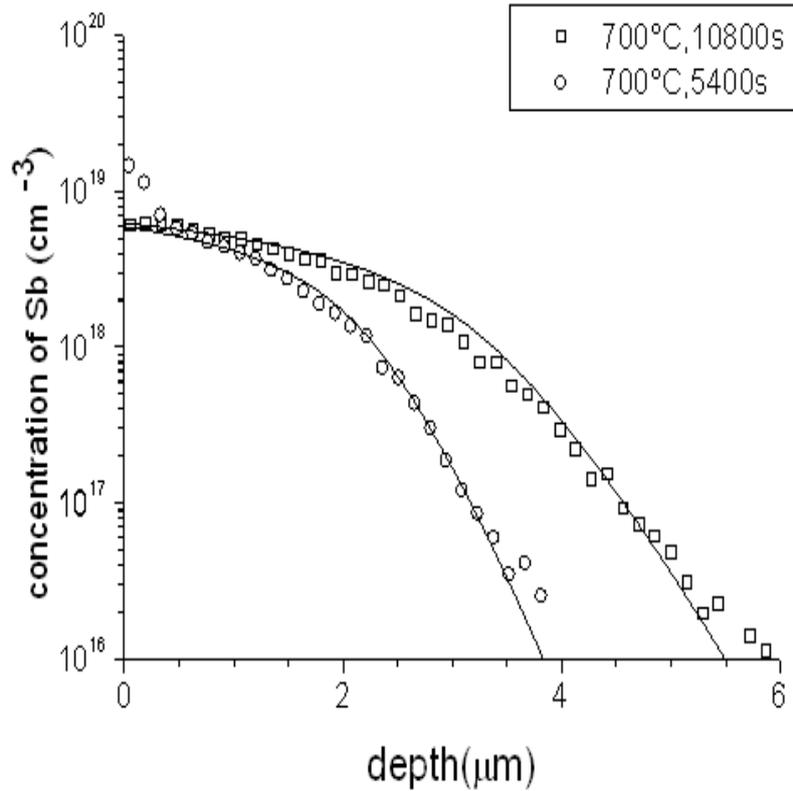
يوضح الشكل (35) و الشكل (36) منحنيات المحاكاة (الخطوط المستمرة) ،التي تحصلنا عليها، والمنحنيات التجريبية لانتشار الأنتيموان عند درجة حرارة تليدين معينة ومدة زمنية معينة. المنحنيات التجريبية مقاسة بواسطة SIMS و SRP. يبين الجدولين 12،13 المقادير المستعملة في المحاكاة. منحنيات المحاكاة تمثل أفضل ما تحصلنا عليه لانتشار الأنتيموان عبر الفجوات الثنائية  $V^{2-}$  والثلاثية  $V^{3-}$  المشحونة سلباً، حسب نسبة المساهمات المختارة.



الشكل (35): المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة (الخطوط المستمرة) والتجريبية (المرجع [29]) المقاسة بواسطة SRP لانتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم

الجدول (12): قيم التركيز الابتدائي على السطح، نسبة المساهمات  $\beta$ ، حاملات الشحنة الذاتية ومعامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة وأزمنة انتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم المستعملة في محاكاة المنحنيات التجريبية المحققة بواسطة (SRP)

المطعمة	$C_0$ (cm <sup>-3</sup> )	t(s)	T (°C)	$\beta$	$n_i$ (cm <sup>-3</sup> )	$D^i$ (cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
Sb	$2.4 \times 10^{18}$	1555200	600	10.4	$2.2 \times 10^{18}$	$3.1 \times 10^{-14}$
Sb	$5.1 \times 10^{18}$	1814400	650	10.9	$3.1 \times 10^{18}$	$2.5 \times 10^{-13}$
Sb	$5 \times 10^{18}$	259200	700	11.5	$4.3 \times 10^{18}$	$9.5 \times 10^{-13}$
Sb	$7.5 \times 10^{18}$	259200	750	12.1	$5 \times 10^{18}$	$3.8 \times 10^{-12}$
Sb	$9.8 \times 10^{18}$	72000	825	12.8	$7.65 \times 10^{18}$	$3.3 \times 10^{-11}$
Sb	$6.3 \times 10^{18}$	14400	900	13.4	$7 \times 10^{18}$	$1.7 \times 10^{-10}$
Sb	$1.9 \times 10^{18}$	1800	920	13.8	$6.7 \times 10^{18}$	$3.3 \times 10^{-10}$



الشكل (36): المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة (الخطوط المستمرة) والتجريبية (المرجع [29]) المقاسة

بواسطة SIMS لانتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم

الجدول (13): قيم التركيز الابتدائي على السطح، نسبة المساهمات  $\beta$ ، حاملات الشحنة الذاتية ومعامل الانتشار

الذاتي الموافقة لدرجات حرارة وأزمنة انتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم المستعملة في محاكاة المنحنيات

التجريبية المقاسة بواسطة ( SIMS )

المطعمة	$C_0$ (cm <sup>-3</sup> )	t(s)	T (°c)	$\beta$	$n_i$ (cm <sup>-3</sup> )	$D^i$ (cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
Sb	$6.2 \times 10^{18}$	10800	700	11.5	$4.1 \times 10^{18}$	$9.9 \times 10^{-13}$
Sb	$5.9 \times 10^{18}$	5400	700	11.5	$4.1 \times 10^{18}$	$9.9 \times 10^{-13}$

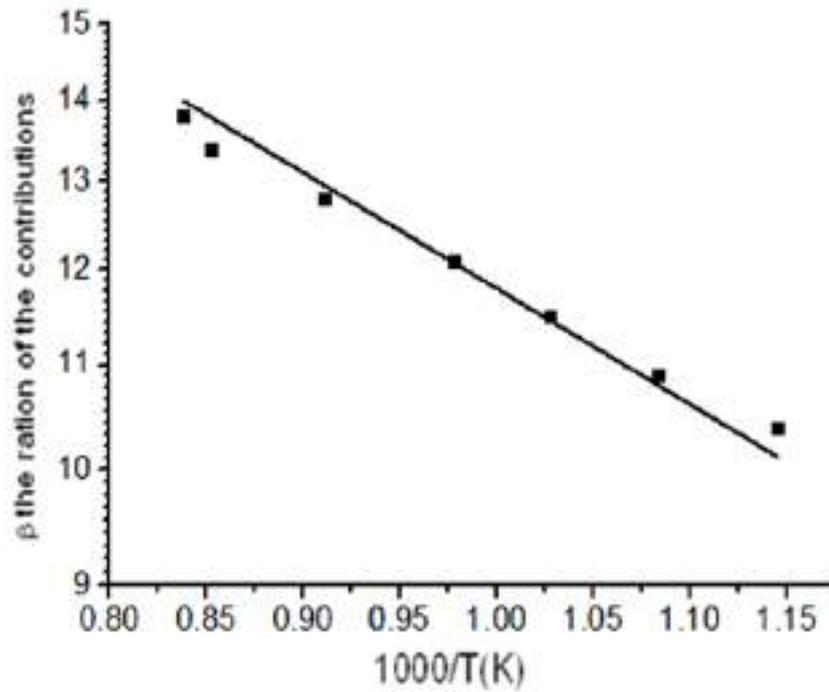
تطابق منحنيات المحاكاة ومنحنيات التجريب يؤكد مساهمة  $V^{2-}$  و  $V^{3-}$  في انتشار الأنتيموان في

الجيرمانيوم حسب قيم نسبة المساهمات  $\beta$  الموافقة لدرجات حرارة الانتشار المبينة في الجدولين 12، 13.

يوضح الشكل (37) تغيرات نسبة المساهمات  $\beta$  لانتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبيًا بدلالة مقلوب درجة الحرارة. تم الحصول على البيان انطلاقًا من معطياتنا المستعملة في المحاكاة. تتغير نسبة المساهمات بدرجة الحرارة. وفقا للمعادلة (40.3)، تكتب المعادلة كالتالي:

$$\beta = 33.9 \exp \left[ -\frac{(0.091)eV}{KT} \right] \quad (4.4)$$

0.091eV الفرق في طاقات التنشيط لانتشار الأنتيموان عبر الفجوتين المساهمتين.



الشكل (37): تغيرات نسبة المساهمات لانتشار الأنتيموان عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبيًا

في الجيرمانيوم بدلالة مقلوب درجة الحرارة

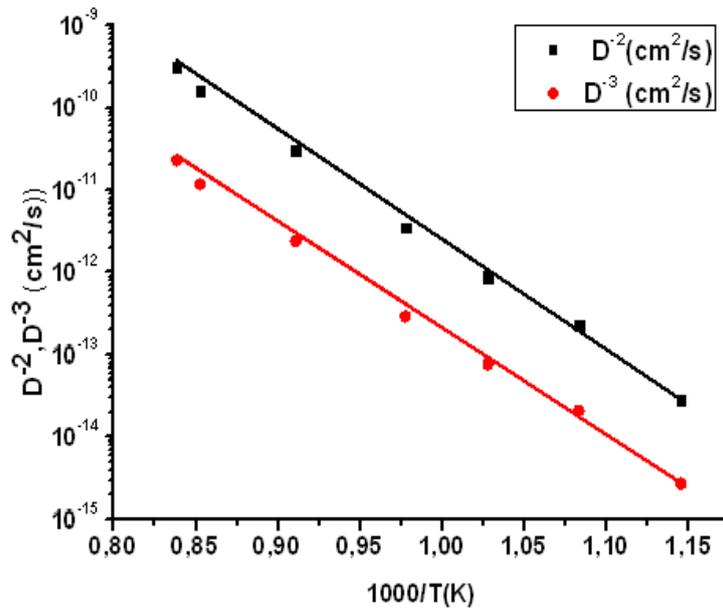
انطلاقًا من المعادلات (38.3)، (39.3) وقيم  $\beta$  الموافقة لدرجات حرارة الانتشار المستعملة في المحاكاة والمبينة في الجدول (12) والجدول (13) نستنتج تغيرات معاملات الانتشار الذاتية  $D^2$  و  $D^3$  المبينة في الشكل (38)

ارتباط  $D^{2-}$  و  $D^{3-}$  بدرجة الحرارة بالنسبة للأنتيموان يكون على النحو التالي:

$$D^{2-} = 63.4 \exp\left[-\frac{2.661\text{eV}}{KT}\right] (\text{cm}^2\text{s}^{-1}) \quad (5.4)$$

$$D^{3-} = 1.87 \exp\left[-\frac{2.570\text{eV}}{KT}\right] (\text{cm}^2\text{s}^{-1}) \quad (6.4)$$

حيث طاقات التنشيط لانتشار الأنتيموان عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبا في الجيرمانيوم هي على الترتيب 2.661 eV، 2.57eV .



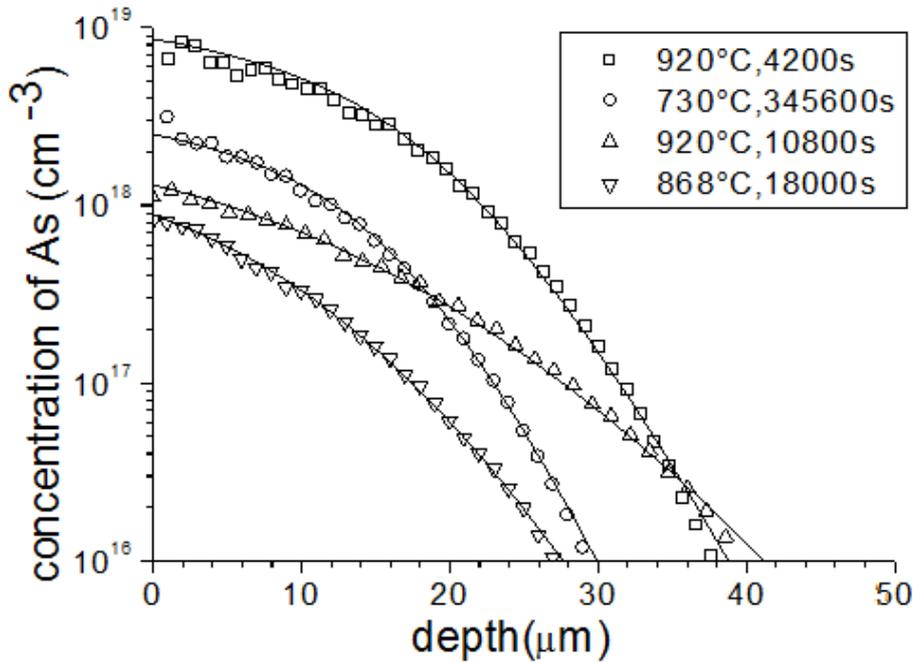
الشكل (38): تغيرات معاملات الانتشار الذاتية للأنتيموان عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبا في الجيرمانيوم بدلالة مقلوب درجة الحرارة

#### 1.3.4 خلاصة نتائج انتشار الأنتيموان :

انتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم يتم بالآلية الفجوية، وذلك بمساهمة فجوات الجيرمانيوم الحاملة للشحنات  $2-$  و  $3-$ ، حيث نسبة المساهمات ترتبط بدرجة الحرارة نتيجة الفرق في طاقات التنشيط عبر الفجوتين المساهمتين والذي يقدر ب  $0.091\text{eV}$ . نسبة المساهمات لانتشار الأنتيموان من خلال الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبا في الجيرمانيوم المحددة من تحليل انتشاره في الجيرمانيوم تعطى حسب المعادلة (4.4). ارتباط  $D^{2-}$  و  $D^{3-}$  بدرجة الحرارة بالنسبة للأنتيموان يكون حسب المعادلتين (5.4)، (6.4) على الترتيب.

#### 4.4 حالة الأرسونيك

يوضح الشكل (39) و الشكل (40) منحنيات المحاكاة (الخطوط المستمرة) ،التي تحصلنا عليها، والمنحنيات التجريبية لانتشار الأرسونيك عند درجة حرارة تلدين معينة ومدة زمنية معينة. المنحنيات التجريبية مقاسة بواسطة SRP. يبين الجدولين 14،15 المقادير المستعملة في المحاكاة. منحنيات المحاكاة تمثل أفضل ما تحصلنا عليه لانتشار الأرسونيك عبر الفجوات الثنائية  $V^{2-}$  والثلاثية  $V^{3-}$  المشحونة سلباً، حسب نسبة المساهمات المختارة.



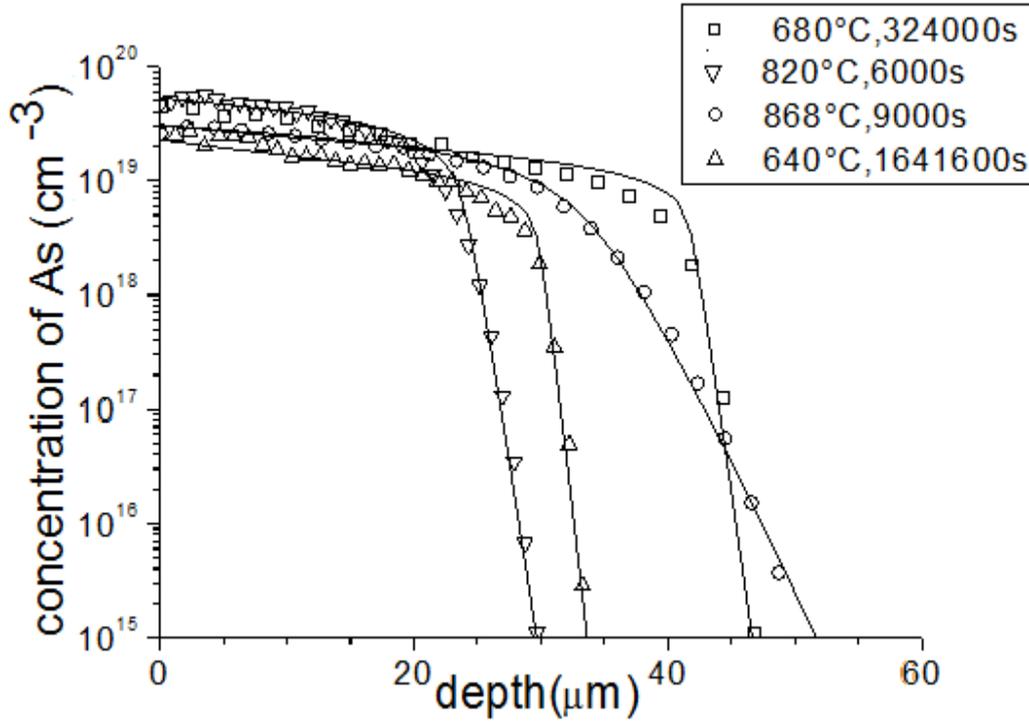
الشكل (39): المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة (الخطوط المستمرة) والتجريبية (المرجع [29]) المحققة

بواسطة SRP لانتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم

الجدول (14): قيم التركيز الابتدائي على السطح، نسبة المساهمات  $\beta$  ، حاملات الشحنة الذاتية ومعامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة وأزمنة انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم المستعملة في

محاكاة المنحنيات التجريبية المقاسة بواسطة ( SRP )

المطعمة	$C_0$ (cm <sup>-3</sup> )	t(s)	T (°c)	$\beta$	$n_i$ (cm <sup>-3</sup> )	$D^i$ (cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
As	$8.6 \times 10^{18}$	4200	920	32	$9.2 \times 10^{18}$	$1.4 \times 10^{-10}$
As	$2.5 \times 10^{18}$	345600	730	10.5	$2.8 \times 10^{18}$	$1.25 \times 10^{-12}$
As	$1.3 \times 10^{18}$	10800	920	32	$9.1 \times 10^{18}$	$1.05 \times 10^{-10}$
As	$8.8 \times 10^{17}$	18000	868	26	$7 \times 10^{18}$	$3.15 \times 10^{-11}$



الشكل (40): المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة (الخطوط المستمرة) والتجريبية مختلف العلامات

(المرجع [29]) المقاسة بواسطة SRP لانتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم

الجدول (15): قيم التركيز الابتدائي على السطح، نسبة المساهمات  $\beta$ ، حاملات الشحنة الذاتية ومعامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة وأزمنة انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم المستعملة في

محاكاة المنحنيات التجريبية المقاسة بواسطة (SRP)

المطعمة	$C_0$ (cm <sup>-3</sup> )	t(s)	T (°c)	$\beta$	$n_i$ (cm <sup>-3</sup> )	$D^i$ (cm <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )
As	$5.3 \times 10^{19}$	6000	820	20	$9.6 \times 10^{18}$	$13.2 \times 10^{-12}$
As	$3.1 \times 10^{19}$	324000	680	8	$3.3 \times 10^{18}$	$2.9 \times 10^{-13}$
As	$3 \times 10^{19}$	9000	868	26	$1 \times 10^{19}$	$5 \times 10^{-11}$
As	$2.3 \times 10^{19}$	1641600	640	5	$2.9 \times 10^{18}$	$3.5 \times 10^{-14}$

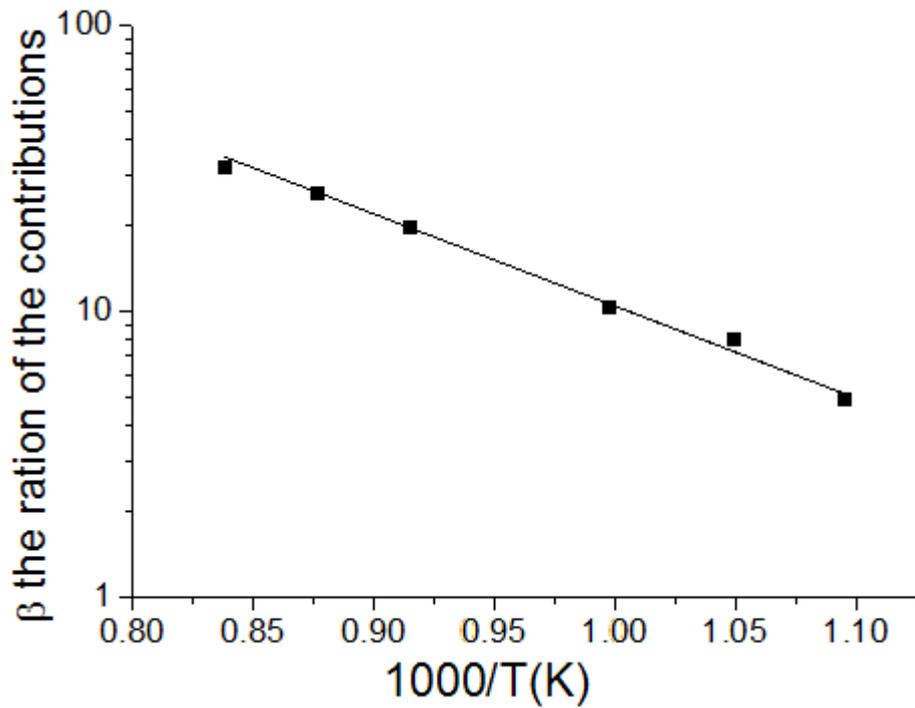
تطابق منحنيات المحاكاة ومنحنيات التجريب يؤكد مساهمة  $V^{2-}$  و  $V^{3-}$  في انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم حسب قيم نسبة المساهمات  $\beta$  الموافقة لدرجات حرارة الانتشار المبينة في الجدولين 14، 15.

يوضح الشكل (41) تغيرات نسبة المساهمات  $\beta$  لانتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبيًا بدلالة مقلوب درجة الحرارة. تم الحصول على البيان انطلاقًا من معطياتنا

المستعملة في المحاكاة. تتغير نسبة المساهمات بدرجة الحرارة وفقا للمعادلة (40.3). تكتب المعادلة كالتالي:

$$\beta = 17.5 \times 10^3 \exp \left[ -\frac{(0.64)eV}{KT} \right] \quad (7.4)$$

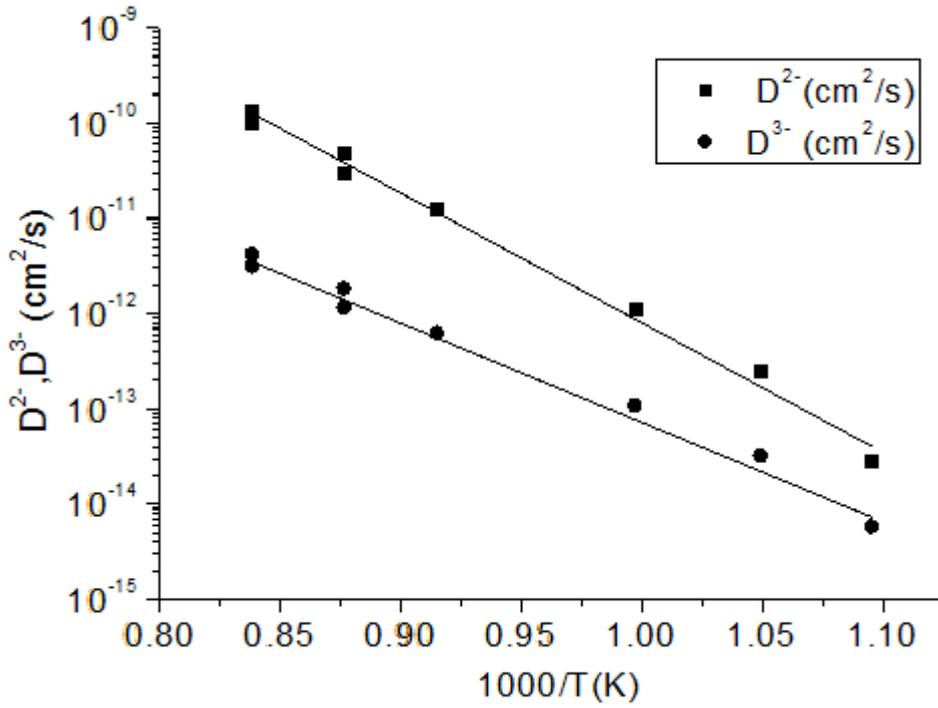
(0.64)eV الفرق في طاقات التنشيط لانتشار الأرسونيك عبر الفجوتين المساهمتين.



**الشكل (41):** تغيرات نسبة المساهمات لانتشار الأرسونيك عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبا

في الجيرمانيوم بدلالة مقلوب درجة الحرارة

انطلاقا من المعادلات (38.3)، (39.3) وقيم  $\beta$  الموافقة لدرجات حرارة الانتشار المستعملة في المحاكاة والمبينة في الجدول (14) والجدول (15) نستنتج تغيرات معاملات الانتشار الذاتية  $D^{3-}$  و  $D^{2-}$  المبينة في الشكل (42).



الشكل (42): تغيرات معاملات الانتشار الذاتية للأرسونيك عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبيًا

في الجيرمانيوم بدلالة مقلوب درجة الحرارة

ارتباط  $D^{2-}$  و  $D^{3-}$  بدرجة الحرارة بالنسبة للأرسونيك يكون على النحو التالي:

$$D^{2-} = 33 \exp\left[-\frac{2.703\text{eV}}{KT}\right] (\text{cm}^2\text{s}^{-1}) \quad (8.4)$$

$$D^{3-} = 1.88 \times 10^{-3} \exp\left[-\frac{2.068\text{eV}}{KT}\right] (\text{cm}^2\text{s}^{-1}) \quad (9.4)$$

حيث طاقات التنشيط لانتشار الأرسونيك عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبيًا في الجيرمانيوم

هي على الترتيب 2.703 eV، 2.068 eV .

#### 1.4.4 خلاصة نتائج انتشار الأرسونيك:

انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم يتم بالآلية الفجوية، وذلك بمساهمة فجوات الجيرمانيوم الحاملة للشحنات  $2^-$  و  $3^-$ ، حيث نسبة المساهمات ترتبط بدرجة الحرارة نتيجة الفرق في طاقات التنشيط عبر الفجوتين المساهمتين والذي يقدر ب  $0.64\text{eV}$ .

نسبة المساهمات لانتشار الأرسونيك من خلال الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبيًا في الجيرمانيوم المحددة من تحليل انتشاره في الجيرمانيوم تعطى حسب المعادلة (7.4). ارتباط  $D^{2-}$  و  $D^{3-}$  بدرجة الحرارة بالنسبة للزنيخ يكون حسب المعادلتين، (8.4) و (9.4) على الترتيب.

خاتمة

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 الفسفور و الأنتيموان و الأرسونيك في الجيرمانيوم باعتباره مرشحا واعدا لتطوير هذه المكونات .

فبعد نمذجة ومحاكاة منحنيات الانتشار التجريبية للفسفور و الأنتيموان والأرسونيك في الجيرمانيوم التي المقاسة بواسطة مطيافية الكتلة المتأينة الثانوية (Secondary ion mass spectrometry) ومنحنيات المقاومة (spreading resistance profiling) توصلنا الى مايلي:

- انتشار الفسفور و الأنتيموان و الأرسونيك في الجيرمانيوم يتم بالآلية الفجوية، وذلك بمساهمة فجوات الجيرمانيوم الحاملة للشحنات -2 و-3.

- نسبة المساهمات لانتشار كل من الفسفور و الأنتيموان و الأرسونيك في الجيرمانيوم عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبا ترتبط بدرجة الحرارة نتيجة الفرق في طاقات التنشيط عبر الفجوتين المساهمتين .

- الفرق في طاقات التنشيط عبر الفجوتين المساهمتين يقدر ب  $0.69\text{eV}$  في حالة الفسفور و  $0.091\text{eV}$  في حالة الأنتيموان و  $0.64\text{eV}$  بالنسبة للأرسونيك .

-طاقة التنشيط للفسفور تقدر  $3.09\text{ eV}$  بالنسبة للانتشار عبر الفجوات ثنائية الشحنة السالبة و  $2.4\text{ eV}$  بالنسبة للانتشار عبر الفجوات ثلاثية الشحنة السالبة.

-طاقة التنشيط للأنتيموان تقدر  $2.661\text{ eV}$  بالنسبة للانتشار عبر الفجوات ثنائية الشحنة السالبة و  $2.570\text{eV}$  بالنسبة للانتشار عبر الفجوات ثلاثية الشحنة السالبة.

-طاقة التنشيط للأرسونيك تقدر  $2.703\text{ eV}$  بالنسبة للانتشار عبر الفجوات ثنائية الشحنة السالبة و  $2.068\text{eV}$  بالنسبة للانتشار عبر الفجوات ثلاثية الشحنة السالبة.

الآفاق المستقبلية لهذا العمل:

- محاكاة تطعيم أنصاف النواقل بالغرس الأيوني

- محاكاة انتشار المطعمات في أنصاف النواقل المركبة الثنائية أو الثلاثية أو الرباعية التي يتوسع استعمالها

مستقبلا

قائمة المراجع

- [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] The International Technology Roadmap for Semiconductors, Emerging Research Devices Summary, 2013 EDITION.
- [6] H. Iwai, "Roadmap for 22 nm and beyond", *Microelectronic Engineering* **86**, 1520 (2009).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] E. Simoen and C. Claeys, "Germanium Based Technologies: From Materials to Devices", edited by C. Claeys and E. Simon (Elsevier, Amsterdam, 2007).
- [10] 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).
- [11] E.E. Haller, "Germanium: From its discovery to SiGe devices", *Materials Science in Semiconductor Processing* **9**, pp 408–422 (2006).
- [12] Michael Riordan and Lillian Hoddeson, "Birth of an Era", *Scientific American The Solid-State Century*,**8**(1) 10(1997).
- [13] François Cardarelli, "Materials Handbook", 2<sup>nd</sup> Edition, Springer-Verlag London Limited 2000, 2008.
- [14] Thomas Canneaux, "Etude de la diffusion des dopants usuels dans le germanium", Thèse Doctorat de l'Université de Strasbourg (2009).
- [15] W.C. Buttermann et J.D. Jorgenson, "Mineral Commodity Profiles: Germanium", United States Geological Survey (2004).
- [16] Safa Kasap, Peter Capper, Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials, Springer(2006)
- [17] PEJ Flewitt and R K WILd, "Physical Methods for Materials Characterisation", Second Edition, Page 19, IOP Copyright (2003).
- [18] Charles Kittel, "Physique de l'état solide", édition, page(220-235, 537-555) (2003) BORDAS, Paris(1983).
- [19] IOFFE, "New Semiconductor Materials, Characteristics and Properties", Archive électronique, <http://www.ioffe.ru/SVA/NSM/Semicond/Ge/>.
- [20] Frédéric Boucard: «Modélisation de la diffusion des dopants dans le silicium pour la réalisation de jonctions fines», thèse de doctorat, Université Louis Pasteur – Strasbourg (2003).

- [21] A. Bentzena and A. Holt, J. S. Christensen and B. G. Svensson: «High concentration in-diffusion of phosphorus in Si from a spray-on source», *Journal of Applied Physics*. **99**(6), 064502 (2006).
- [22] Chi On Chui, Kailash Gopalakrishnan, Peter B. Griffin, James D. Plummer, and Krishna C. Saraswat: «activation and diffusion studies of ion-implanted p and n dopants in germanium », *Appl. Phys. Lett.* **83** (16), 3275 (2003).
- [23] 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).
- [24] F.J. Morin et J.P. Maita : « Conductivity and Hall Effect in the Intrinsic Range of Germanium», *Physical Review*, **94**(6), pp 1525-1529 (1954).
- [25] Daniel Mathiot : « Dopage et Diffusion dans Le Silicium », (InESS, UMR 7163, Laboratoire Commun CNRS - ULP)2004.
- [26] Y.Qure: « Defauts Ponctuels Dans Les Métaux», Centre d'études nucléaires de Fontenay-aux-Roses, Masson et Cie, Page(77,88) Editeurs, ParisVI, (1967).
- [27] B.Boltaks: « Diffusion et Défauts Ponctuels Dans Les Semi-conducteurs », Page(119,181) , Editions Mir. Moscou, (1977).
- [28] T. Canneaux, D. Mathiot, J.P. Ponpon, *Thin Solid Films* **518**, pp 2394-2397 (2010).
- [29] S. Brotzmann and H. Bracht: « Intrinsic and extrinsic diffusion of phosphorus, arsenic, and antimony in germanium», *Appl. Phys.* **103**, 033508 (2008).
- [30] S. Brotzmann , H. Bracht, E. Simoen, E. E. Haller, J. S. Christensen and P. Werner : «Diffusion and defect reactions between donors, C, and vacancies in Ge. I. Experimental results», *Phys. Review.* **B77**, 235207 (2008).
- [31] P. Tsouroutas, D. Tsoukalas, and H. Bracht: « Experiments and simulation on diffusion and activation of codoped with arsenic and phosphorous germanium», *Appl. Phys.* **108**, 024903 (2010).
- [32] H. Bracht: «Self-and foreign-atom diffusion in semiconductor isotope heterostructures. II. Experimental results for silicon», *Phys. Rev. B* **75**, 035210 (2007).
- [33] M. Koike, Y. Kamata, T. Ino, D. Hagishima: « Diffusion and activation of *n*-type dopants in germanium; *Appl. Phys.* **104**, 023523 (2008).
- [34] A.R. Peaker, A. Satta, V.P. Markevich, E. Simoen and B. Hamilton: « Germanium ... The Semiconductor of Tomorrow», *AIP Conf. Proc.* **866**, 3(2006).
- [35] 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).
- [36] M.J. Puska: « Electronic structures of point defects in III-V compound semiconductors», *J. Phys: Condens. Matter* **1**, pp 7347-7366 (1989).
- [37] 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).
- [38] 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).
- [39] 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).

- [40] 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).
- [41] 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).
- [42] 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).
- [43] 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).
- [44] 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).
- [45] 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).
- [46] L.Montes:«Techniquesdedopage», ENSERG/ENSPG/ENSEEG-OPTION 'Dispositifs et Microsystemes'(2007).
- [47] Scoten W.Jones: « Diffusion in Silicon », IC Knowledge LLC, copyright (2000).
- [48] 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).
- [49] 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).
- [50] Scott T.Dunham, Alp H.Gencer, and Srinivasan Chakravarthi: «Modeling of dopant diffusion in Silicon », *Ieice Trans, Electron, Vol.E82-C, No, 800*(1999).
- [51] Jens Lang, Wilhelm Merz :«Two dimensional adaptive simulation of dopant diffusion in silicon », *Comput .Visual. Sci* **3**: 169–176(2001).
- [52] Americo Marrocco: « Simulations numériques dans la fabrication des Circuits A Semiconducteurs», (Process Modelling) Institut National De Recherche en informatique et en Automatique-France (1984).
- [53] Hartmut Bracht: « Diffusion Mechanisms and Intrinsic Point-Defect Properties in Silicon», *Mrs Bulletin*,**25**(6)22( 2000).
- [54] J.R.KING: « Asymptotic analysis of a combined dissociative and kick-out diffusion », *Journal of Applied Mathematics*,**56**, 33-63(1996).
- [55] P. Laitinen: « Self- and impurity diffusion in intrinsic relaxed silicon Germanium », thèse de doctorat, Université de Jyväskylä, Finlande (2004).
- [56] S. Ismail-Beigie and E fthimos kaxiras: « Free Energy of the Concrted-Exchange Mechanism for Self-Diffusion in Silicon», *Physical. Review B***53** (3), 1310 (1996).
- [57] E. D. Allen, J. R. King and M. G. Meere: « Impurity Diffusion Through Strained Semiconductors», *Appl. Math, Vol. 58*(4),616(2005).
- [58] J. R. King and C. P. Please: «Diffusion of Dopant in Crystalline Silicon: An Asymptotic Analysis », *Journal of Appl. Math.* **37**,185-197(1986).

- [59] Peter Pichler: « Intrinsic point defects, impurities, and their diffusion in silicon», Page 251, Springer Wien New York 2004.
- [60] R. Bader and W. Merz: « Local Existence Result of The Single Dopant Diffusion including Cluster Reactions of High Order», Applied. Analysis. **6**(1) ,13–34 (2001).
- [61] J. R. King: « Asymptotic Analysis of Animpurity-Defect Pair-Diffusion model », appL. Math, Vol **44**, P 3,370(1991).
- [62] Andreas Bentzen: « Phosphorus Diffusion and Gettering in Silicon Solar Cells», thèse dedoctorat, Université of Oslo (2006).
- [63] Mark Goorsky: « ION IMPLANTATION», InTech(2012).

---

**مختصر:** برز الجيرمانيوم مؤخرا كمرشح واعد لتعويض السيليسيوم في المكونات الإلكترونية المتقدمة وتطبيقاتها الضوئية. معرفة معالم انتشار المطعومات في هذا النصف ناقل تعد ضرورية لصناعة دارات إلكترونية منه عالية الأداء. هذه الدراسة حددت كيفية ارتباط نسبة المساهمات بدرجة الحرارة للانتشار المنفرد لكل من الفسفور P ، الأنتيموان Sb و الأرسونيك As عبر الفجوات الثنائية والثلاثية المشحونة سلبا في الجيرمانيوم مع طاقات التنشيط، للفسفور 3.09 eV ، 2.4 eV على الترتيب و للأنتيموان 2.661 eV ، 2.570eV على الترتيب و 2.703 eV، 2.068 eV على الترتيب بالنسبة للأرسونيك . في هذا العمل قمنا بنمذجة الانتشار وفق الآلية الفجوية والحل العددي لقانون فيك الثاني آخذين بعين الاعتبار ارتباط معامل الانتشار الفعال بنسبة المساهمات ، و محاكاة منحنيات انتشار الفسفور والأنتيموان والأرسونيك التجريبية في الجيرمانيوم.

الكلمات المفتاحية: الفسفور، الأنتيموان، الأرسونيك ، انتشار، الآلية الفجوية

**Résumé:** Récemment le germanium a émergé comme un candidat prometteur pour le développement des dispositifs de haute performance et de leurs applications optoélectroniques. La connaissance des paramètres de diffusion des dopants dans le germanium est essentiel pour réaliser des dispositifs performants. Cette thèse étudie la relation des rapports des contributions de la diffusion de phosphore, l'antimoine et l'arsenic dans le germanium, avec la température, via les lacunes doublement et triplement chargés négativement avec des énergies d'activation 3.09 eV et 2.4 eV, respectivement pour le phosphore, 2.661 eV 2.570 eV, respectivement pour l'antimoine et 2.703 eV et 2.068 eV, respectivement pour l'arsenic. Dans ce travail, nous avons modélisé la diffusion des dopants étudiés dans le Ge par le mécanisme, lacunaire et résolu numériquement la deuxième loi de Fick, tenant en compte la dépendance du coefficient de diffusion effective avec le rapport des contributions. Enfin, nous avons simulé les profils de diffusion expérimentaux pour les dopants dans Ge.

**Mots clés:** phosphore; l'antimoine; l'arsenic; diffusion; mécanisme lacunaire

---

**Abstract:** Recently germanium has emerged as a promising candidate for the development of high performance devices and its optoelectronic applications. Knowing the parameters of the dopant diffusion in this material is essential to perform efficient Ge-Based devices. This thesis study the relation between the ratios of the contributions to diffusion of phosphorus, antimony and arsenic in germanium, with the temperature, from doubly negatively charged (2-) and triply negatively charged (3-) vacancies with activation energies, 3.09 eV , 2.4 eV, respectively for phosphorus, and 2.661 eV , 2.570 eV, respectively for antimony, and 2.703 eV, 2.068 eV, respectively for arsenic. In this work we modulate the diffusion of dopant studied in Ge by the vacancy mechanism and numerical solution of Fick's second law, taking into account the dependence of the effective diffusion coefficient on the ratio of the contributions. We simulate the experimental diffusion profiles for the dopant studied in Ge.

**Keywords:** phosphorus; antimony; arsenic; diffusion; vacancy mechanism

Publications Internationales :

1) JOURNAL OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS Vol. 17,  
No. 7-8, July – August 2015, p. 1070 - 1074

Publications Nationales :

1) Annales des Sciences et Technologie ( حواليات العلوم والتكنولوجيا ) Réf:P080314  
Ouarglale 08Juin2014

Communications Nationales :

1)- Modélisation et simulation de la diffusion du phosphore dans le germanium,  
3<sup>èmes</sup> Journées de la Physique et de ses application 19-20 Mai 2014 Tiaret

2)- Etude la diffusion de l'antimoine dans le germanium, Ecole Thématique  
Matériaux pour l'Optique et la Photonique MOP - du 05 au 12 Septembre 2014 à  
Guelma, organisée par le réseau photonique NOUR21

3) 3ème Séminaire International sur la Physique des Plasmas(SIPP'2015) Ouargla,  
Algérie – 16 et 17 Février 2015