

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة قاصدي مرباح - ورقلة

قسم العلوم الفيزياء

مذكرة لنيل شهادة ماستر

تخصص: فيزياء المواد

من إهداء الطالب: خنفر سيفه الاسلام

بعنوان :

تحديد مميزات انتشار الأنثيموان في

الجيرمانيوم

إشرافه : د. محمد القادر سويقات

لجنة المناقشة:

رئيسا	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ محاضر - أ	سوداني محمد البار
مناقشا	المدرسة العليا للأساتذة ورقلة	أستاذ مساعد أ	سليمانبي ادريس
مشرفا ومقروا	المدرسة العليا للأساتذة ورقلة	أستاذ محاضر - أ	سويقات محمد القادر
مساعد مشرفه	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ محاضر - أ	بن طويلة عمر

الموسم الجامعي: 2021/2020

الإهداء

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

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

وإلى من كان له الفضل الكبير في بلوغي هذا التعليم فقد وضعني على الطريق الصحيح " والدي الحبيب "، أطال الله في عمره. إلى من أظهروا لي ما هو أحلى من الحياة إخوتي وأخواتي الأعزاء فقد كانوا ملجئي وملاذي في كل الصعاب إلى من تذوقت معهم أحلى اللحظات .

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

إلى كل من نسيه القلم وحفظه القلب.

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

سيف الإسلام خنفر

شكر وتقدير

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

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

جعل الله ذلك في ميزان حسناته إن شاء الله

إلى الأساتذة أعضاء لجنة المناقشة المتكونة من، الذين تشرفنا بقراءتهم للبحث وتقييمهم له و نعتز بملاحظاتهم وتصويباتهم.

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

كما نشكر القائمين المدرسة العليا على حسن استقبالهم لنا وصبرهم معنا.

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

الفهرس

الصفحة	العنوان
I	الإهداء
VI	الشكر والتقدير
VI	الفهرس
VI	قائمة الجداول
VI	قائمة الأشكال
LX	قائمة الرموز
1	المقدمة
الفصل الأول: أنصاف النواقل ومميزاتها	
4	تمهيد
4	1.1 العوازل ، أنصاف النواقل و النواقل
4	1.1.1 العوازل
4	2.1.1 النواقل
5	3.1.1 أنصاف النواقل
6	2.1 أنصاف النواقل الأصبيلة (الذاتية)
7	3.1 أنصاف النواقل المطعمة (اللاذاتية)
7	1.3.1 نصف الناقل من النوع n
9	2.3.1 نصف الناقل من النوع p
10	4.1 طرق التطعيم

10	–الانتشار الحراري	1.4.1	
13	الغرس الايوني	2.4.1	
15	مراجع الفصل الأول		
الفصل الثاني: الجيرمانيوم			
تمهيد			
17	اكتشاف الجيرمانيوم.	1.2	
18	تواجده في الطبيعة	2.2	
19	معادن الجيرمانيوم	3.2	
20	تنقية الجيرمانيوم	4.2	
20	طريقة تشوخرالسكي (Czochralski):	1.4.2	
21	طريقة الصهر النطاقي Float zone	2.4.2	
22	البنية البلورية	5.2	
22	التكوين البلوري	1.5.2.	
24	الفاصل الطاقوي للجيرمانيوم	6.2	
24	تركيز حاملات الشحنة الذاتية	7.2	
26	العيوب النقطية للجيرمانيوم	8.2	
27	تركيز العيوب في حالة التوازن	1.8.2	
27	آلية الانتشار المجهرية للأنتيموان في الجيرمانيوم	9.2	
28	معامل الانتشار الذاتي	10.2	
28	الدراسة النظرية لمعامل الانتشار	1.10.2	
30	معامل انتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم:	11.2	
32	مراجع الفصل الثاني.		
الفصل الثالث: نمذجة ومحاكاة انتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم			

34	تمهيد	
35	نمذجة انتشار الأنتيموان	1.3
36	القانون الثاني لـ فيك	2.3
37	محاكاة منحنيات الانتشار	3.3
39	4.3 نتائج ومناقشة	4.3
39	محاكاة المنحنيات التجريبية و مقارنتها	1.4.3
40	عامل التناسب التربيعي	2.4.3
41	حاملات الشحنة الذاتية	3.4.3
41	معامل الانتشار الذاتي	4.4.3
43	مراجع الفصل الثالث.	
44	الخاتمة	
45	الملخص	

الصفحة	محتوى الجداول	الرقم
الفصل الأول		
12	يبين منابع مطعمات النوع السالب والموجب	1
الفصل الثاني		
20	الخواص الفيزيائية للجيرمانيوم	2
20	يوضح بعض خامات الجيرمانيوم	3
32	قيم الحد الأنطروبييل Sb وطاقة التنشيط في الجيرمانيوم	4
الفصل الثالث		
42	قيم التركيز الابتدائي على السطح ، معامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة انتشار الانتيموان في الجيرمانيوم المستعملة في المحاكاة.	5
44	قيم معامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة انتشار الأنتموان في الجيرمانيوم	6

قائمة الأشكال

الصفحة	محتوى الشكل	الرقم
الفصل الأول		
7	يوضح الفجوة الطاقية الممنوعة Eg	1
8	يوضح الروابط التكافؤية، الالكترونات الحرة، الثقوب	2
10	منح الإلكترونات من السوية المانحة إلى عصابة النقل	3
10	يمثل تطعيم Si بالفسفور P للحصول على نصف ناقل من النوع n	4
11	أخذ الإلكترونات من سوية الآخذة إلى عصابة التكافؤ	5
12	يمثل تطعيم Si بالبور B للحصول على نصف ناقل من النوع P	6
13	منحنى الانتشار في مرحلة التوضع المسبق	7
13	منحنى الانتشار في مرحلة التوزيع	8
14	مخطط التجهيز المستخدم في التطعيم	9
15	مخطط يبرز آلية الغرس الايوني	10
الفصل الثاني		
20	أولالترانزستور صنع في مختبراتيل في عام 1948.	11
21	يوضح موقع الجيرمانيوم في الجدول الدوري	12
23	يوضح معدن رينيريت renierite	13
24	يوضح طريقة (Czochralski).	14
24	يوضح طريقة الصهر النطاقي.	15
25	جيرمانيوم أحادي البلورة .	16
25	يوضح ذرة الجيرمانيوم.	17

26	يوضح الذرات بداخل البلورة .	18
26	رسم تخطيطي يوضح البنية البلورية للجيرمانيوم	19
27	مقارنة بين تغيرات الفاصل الطاقى للجيرمانيوم والسيليسيوم بدلالة درجة الحرارة	20
29	يوضح تواجد الفجوة داخل الشبكة البلورية	21
29	يوضح تواجد الفجوة داخل الشبكة البلورية	22
30	مخطط يبرز الآلية الفجوية	23
31	الحاجز الكموني أثناء الانتقال من موضع الى آخر	24
33	يمثل تغيرات معامل انتشار Sb في الجيرمانيوم حسب المراجع المذكورة	25
الفصل الثالث		
41	يوضح تجزئة البعد وزمن الانتشار.	26
43	المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة (الخطوط المستمرة) والمنحنيات التجريبية [4] لانتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم	27
44	تغيرات عامل التناسب التربيعي مع مقلوب درجة الحرارة.	28
45	تغيرات تركيز حاملات الشحنة الذاتية n_i بدلالة مقلوب درجات الحرارة	29
46	تغيرات معامل الانتشار الذاتي بدلالة مقلوب درجات الحرارة	30

قائمة الرموز

الرمز	مدلوله	وحدته
E_g	عرض العصابة الممنوعة	eV
E_c	مستوى النقل	eV
E_v	مستوى التكافؤ	eV
E_F	مستوى فيرمي	eV
n_i	كثافة حاملات الشحنة الذاتية	cm^{-3}
N_c	الكثافة الفعالة للإلكترونات في عصابة النقل	cm^{-3}
N_v	الكثافة الفعالة للثقوب في عصابة التكافؤ	cm^{-3}
N	تركيز الإلكترونات الحرة	cm^{-3}
P	تركيز الثقوب	cm^{-3}
T	درجة الحرارة	K
K_B	ثابت بولتزمان	eV.K ⁻¹
C	تركيز الشائبة المطعمة	atom.cm ⁻³
D	معامل الانتشار	$cm^2.s^{-1}$

مقدمة عامة:

شهد مجال صناعة المكونات الالكترونية والالكترونية الضوئية، القائمة أساسا على المواد النصف ناقلة، تطورا كبيرا في السنوات الأخيرة، وهو ما يؤكد التزايد الأسي لعدد الترانزستورات السيليكونية المستعملة في الرقاقات الالكترونية [1،2،3]. مواصلة تطوير هذه الرقاقات مرهونا بزيادة فعاليتها وانقاص تكلفتها، وهو ما يفرض استمرار تحجيم مكوناتها و ضمان تحسين أدائها.

حاليا ومنذ 1960 تكنولوجيا الالكترونيات تعتمد بشكل أساسي على السيليسيوم ويرجع ذلك للتحكم في صناعته و قلة تكلفته مقارنة بأنصاف النواقل الأخرى. لكن مواصلة مواكبة لسيرورة التطور التكنولوجي الحاصل في مجالي الاعلام والاتصال أصبحت تواجه صعوبة متزايدة مع كل جيل من التكنولوجيا، فأى تحجيم لهذه المكونات السيليكونية تجعل التيارات الطائفة من السطح البيني لأكسيده جد معتبرة. مواصلة سيرورة التطور لهذه المكونات، تفرض استبدال أكسيد السيليسيوم Si_2O_4 بمواد لها ثابت عزل أكبر والتي تدعى بـ (high-K) مثل HfO_2 وهو ما يفقد السيليسيوم أهميته مقارنة بأنصاف النواقل الأخرى التي لها حركية حاملات الشحنة مرتفعة و فاصل طاقي قصير [4،5].

في الآونة الأخيرة العديد من الأبحاث رشحت الجيرمانيوم كبديل واعد للسيليسيوم من أجل مواصلة تطوير هذه المكونات لما يتميز به من خصائص مثل حركية حاملات الشحنة المرتفعة وقصر الفاصل الطاقي [6 - 11]. في التطبيقات الالكترونية الضوئية الجيرمانيوم يتميز بصغر معامل الامتصاص الأمر الذي يجعل دجه مجبذا 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 هذه المذكرة نتناول دراسة انتشار الأنيموان في الجيرمانيوم، وذلك من خلال نمذجة انتشاره بالآلية الفجوية، آخذين بعين الاعتبار مساهمة الفجوات ثنائية الشحنة السالبة، ومحاكاة منحنيات الانتشار التجريبية له في الجيرمانيوم ببرنامج بلغة الفورترون. أتمنا ذلك وفق خطة بحث تضمنت مقدمة و ثلاثة فصول مع خاتمة للدراسة.

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

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

❖ الفصل الثالث : تضمن نمذجة انتشار الأنيموان في الجيرمانيوم و نتائج محاكاة منحنيات انتشاره التجريبية في الجيرمانيوم مع مناقشتها.

❖ الخاتمة لخصنا فيها أهم النتائج المتحصل عليها.

مراجع المقدمة:

- [1] G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits", *Electronics*, **38**(8),114 (1965).
- [2] G. Dan Hutcheson and Jerry D. Hutcheson, "Technology and Economics in the Semiconductor Industry", *Scientific American The Solid-State Century*,**8**(1) 66(1997).
- [3] David C. Brock, "Understanding Moore's Law: Four Decades of Innovation", *J. Chem. Educ* , **84** (8) 1278(2007).
- [4] C. O. Chui, S. Ramanathan, B.B. Triplett, P. C. McIntyre, and K.C. Saraswat, "Germanium MOS Capacitors Incorporating Ultrathin High-k Gate Dielectric", *IEEE Electron Device Lett.* **23**, 473 (2002).
- [5] M.J. Puska: « Electronic structures of point defects in III-V compound semiconductors», *J. Phys: Condens. Matter* **1**, pp 7347-7366 (1989).
- [6] H. Iwai, "Roadmap for 22 nm and beyond", *Microelectronic Engineering* **86**, 1520 (2009).
- [7] The International Technology Roadmap for Semiconductors, Emerging Research Devices Summary, 2013 EDITION.
- [8] H. Kim, C. O. Chui, K. Saraswat, P. C. McIntyre, "Local epitaxial growth of ZrO₂ on Ge (100) substrates by atomic layer epitaxy", *Appl. Phys. Lett.* **83**,2647 (2003).
- [9] H. Shang, H. Okorn-Schmidt, J. Ott, P. Kozlowski, S. Steen, E. C. Jones, H. S. Wong, and W. Hanesch, "Electrical characterization of germanium p-channel MOSFETs", *IEEE Electron Device Lett.* **24**, 242 (2003).
- [10] E. Simoen and C. Claeys, "Germanium Based Technologies: From Materials to Devices", edited by C. Claeys and E. Simon (Elsevier, Amsterdam, 2007).
- [11] K.C. Saraswat, D. Kim, T. Krishnamohan, D. Kuzum, A.K. Okyay, A. Pethe, H. Yu, "Germanium for High Performance MOSFETs and Optical Interconnects", *ECS Transactions*, **16** (10) 3-12 (2008).

الفصل الأول:

أنصاف النواقل ومميزاتها

تمهيد:

تشكل المواد النصف ناقلة الأساس الذي تقوم عليه الإلكترونيات الحديثة اليوم فهناك العديد من النبائط والمركبات الإلكترونية تدخل في تطبيقات صناعية واسعة مبنية على خواص هذه المواد، نذكر منها على سبيل المثال لا الحصر الديودات بأنواعها المستخدمة كحساسات أو مقاومات أو مصدر للضوء، الترانزستورات بأنواعها، الخلايا الشمسية، الألواح الفوتوفولطية الشمسية التي تحول الطاقة الضوئية مباشرة إلى طاقة كهربائية والدارات المتكاملة الرقمية والتماثلية [1]. في هذا الفصل نتعرض إلى أنصاف النواقل ومميزاتها مثل الإلكترونات الحرة (free electrons) ، والثقوب (holes)، إضافة إلى تطعيم هذه المواد (doping) [2] وبعض استعمالاتها.

1.1- العوازل ، أنصاف النواقل ، والنواقل

تصنف المواد الصلبة حسب توصيلتها الكهربائية أو مقاومتها النوعية إلى ثلاث مجموعات عازلة، نصف ناقلة وناقلة بالاعتماد على تراكب حزم الطاقة للمادة و مقدار فجوة الطاقة الممنوعة (Eg) التي تفصل بين حزمة النقل (Bc) و حزمة التكافؤ (Bv) [3].

1.1.1- العوازل

في العوازل عند درجة 0 K تكون حزمة النقل فارغة تماما من الإلكترونات بينما حزمة التكافؤ تكون ممتلئة، وحتى عند رفع درجة حرارتها تبقى هذه الخاصية في العوازل ، وذلك لأن الطاقة الحرارية KT غير كافية لنقل إلكترون من حزمة التكافؤ إلى حزمة النقل وجعله حرا ، وهذا راجع إلى كبر الفاصل الطاقي Eg حيث تقدر قيمة هذه الطاقة ب 9v [4.1]، فناقلية العوازل ضعيفة جدا تتراوح قيمها في مجال ($10^{-18} \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ - $10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$) [5,6]..

2.1.1- النواقل

في المادة الناقلة الإلكترونات الحرة هي نفسها إلكترونات التكافؤ نتيجة تراكب عصابة النقل وعصابة التكافؤ فوق بعضها البعض ، لذا فليس هناك فاصل طاقي Eg وعصابة النقل تكون مشغولة جزئيا حتى عند درجات الحرارة المنخفضة ، مما يؤدي إلى ناقلية كهربائية عالية جدا تتراوح بين ($10^6 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$ و $10^4 \Omega \cdot \text{cm}^{-1}$) [1]. تمتاز بمقاومة نوعية صغيرة في الدرجة العادية من الحرارة، وتعود جودة نقلها للتيار الكهربائي إلى وفرة الإلكترونات الحرة فيها.

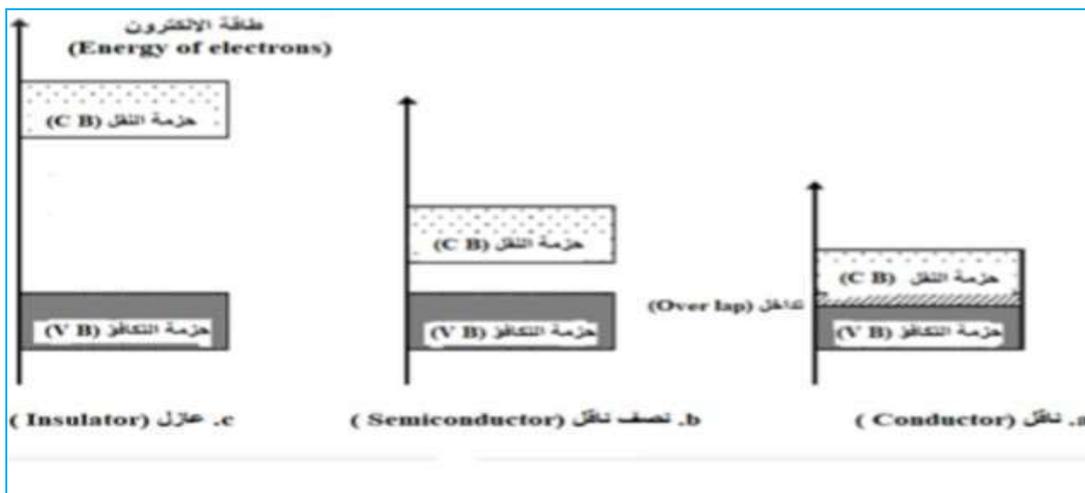
3.1.1- أنصاف النواقل:

هي مواد عازلة تملك شريط ممنوع صغير عند درجة الصفر مئوية وتصبح ناقلة بارتفاع درجة الحرارة بتأثير اي نوع من الطاقة (ضوء، اشعة كهرومغناطيسية.....الخ) [6].

لها ناقلية تقع بين ناقلية النواقل والعوازل أي بحدود ($10^4 \Omega.cm - 10^8 \Omega.cm$) [5] بالإضافة إلى أن الفاصل الطاقي E_g لديها صغير بالمقارنة مع العوازل ($1 eV$) حيث يمكن للإثارة الحرارية أو الضوئية أن تجعل الالكترونات تنتقل من عصابة النقل Bc إلى عصابة التكافؤ Bv [7]. وتقل المقاومة بصورة كبيرة في اشباه الموصلات نتيجة اضافة الشوائب اليها وأكثر من ذلك يمكن اختيار الشوائب بطريقة خاصة تغيير مقاومة اشباه الموصلات في الاتجاه المطلوب ولذلك تستخدم اشباه الموصلات المشابه على نطاق واسع [6].

عند رفع درجة حرارة اشباه الموصلات تزداد كمية حاملات الشحنة المتحركة وتقل المقاومة بشكل كبير ولكنها لا تتصف بقابلية التوصيل العالي والعكس صحيح حيث تزداد المقاومة بخفض درجة الحرارة وتصبح قريبة من مقاومة المواد العازلة [6]. تتغير خواص انصاف النواقل في الجدول الدوري من سطر الى اخر ومن عمود الى اخر وتكون عموما ذات بنية ماسية تنقسم الى قسمين .

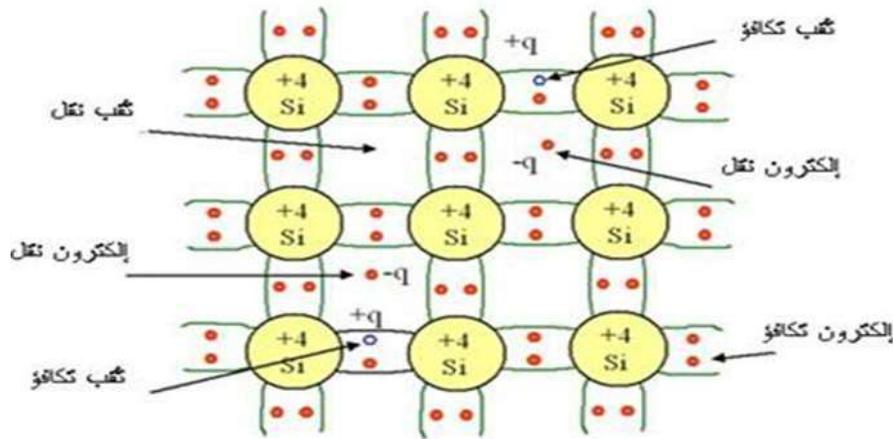
انصاف نواقل بسيطة: وهي العناصر الموجودة في العمود الرابع من الجدول الدوري لماندوليف وهي عناصر طبيعية انصاف نواقل مركبة (خلاط شبه موصل): لها صيغة من الشكل A_xB_{8-x} حيث x رتبة العمود في الجدول الدوري. كما توجد اشباه موصل ثنائية التركيب حيث تحتوي عنصرين على الاقل من نفس العمود , وكما يمكن الحصول كذلك على مركبات رباعية الصيغة [6].



الشكل (1) : يوضح الفجوة الطاقية الممنوعة E_g [3]

2.1- أنصاف النواقل الأصبيلة (الذاتية)

هي مواد نصف ناقلة غير مطعمة بشوائب غريبة ونسبة العيوب فيها ضئيلة جدا، وهذا يعني ان الثقوب في حزمة التكافؤ هي الشواغر الناجمة عن الالكترونات التي أثيرت إلى حزمة النقل. في درجة الصفر مطلق تكون حاملات الشحنة في النصف الناقل الأصبيل معدومة، لكن عندما ترتفع درجة الحرارة تتولد أزواج من الالكترونات والثقوب نتيجة اثاره الكترونات حزمة التكافؤ حراريا أو ضوئيا عبر فجوة الطاقة إلى حزمة النقل. هذه الأزواج من الالكترونات والثقوب هي حاملات الشحنة الوحيدة في نصف الناقل الاصبيل.



الشكل (2) : يوضح الروابط التكافؤية، الالكترونات الحرة، الثقوب

من المعلوم ان كل ذرة في الشبيكة البلورية للجermanيوم او السيليكون او الكربون تكون محاطة باربعة ذرات مجاورة لكل منها اربعة الكترونات في مدارها الخارجي وتشارك كل ذرة في هذه البلورة بالكتروناتها الاربعة مع جرائها الاربعة (الشكل السابق). تنشأ قوى الربط في هذه الرابطة من التفاعل بين الالكترونات المشتركة الذي تمليه قواعد الميكانيك الكمومي، يعرف هذا الربط بالربط التكافؤي وفيه يشكل كل زوج من الالكترونات رابطة تكافؤية . ونتيجة لهذه الرابطة لا توجد الكترونات حرة متوفرة للشبيكة البلورية في البنية الماسية التكافؤية.

يمكن تصور عملية توليد أزواج الالكترونات والثقوب بطريقة وصفية اعتمادا على كسر الروابط الالكترونية في الشبيكة البلورية لنصف الناقل , اذا كسرت احدى الروابط الالكترونية في السيليكون وانحلج إلكترون التكافؤ من موضعه في الرابطة بحيث يصبح حرا وقادرا على التجوال في الشبيكة البلورية فانه يتولد إلكترون نقل مخلفا وراءه رابطة محطمة (اي ثقبا) كما يظهر في الشكل السابق حيث الطاقة اللازمة لكسر الرابطة هي طاقة فجوة الطاقة $E_g [2,4,6,16]$.

يساعدنا هذا الطراز على تصور الآلية الفيزيائية لتوليد أزواج الإلكترونات والثقوب لكنه يبقى طرازاً وصفيًا، أما من أجل فهم أفضل لسلوك أنصاف النواقل ومن أجل الحساب الكمي فنحن بحاجة لدراسة أكثر عمقا تتناول بالتفصيل كثافة الإلكترونات وكثافة الثقوب في حزمتي النقل والتكافؤ على التوالي. إن ذلك لا يتحقق إلا باستعمال طراز آخر وهو طراز حزم الطاقة وهذا ما سنفعله في فقرة لاحقة .

يبين الشكل السابق أنه في أنصاف النواقل الأصلية (بدون شوائب) يرتبط وجود كل إلكترون في حزمة النقل بوجود ثقب في حزمة التكافؤ. نستنتج أن كثافة الإلكترونات في حزمة النقل n تساوي كثافة الثقوب في حزمة التكافؤ p في نصف الناقل الأصلي وعليه يتحقق في نصف الناقل الأصلي العلاقة $n=p$ [2,4,6,16].

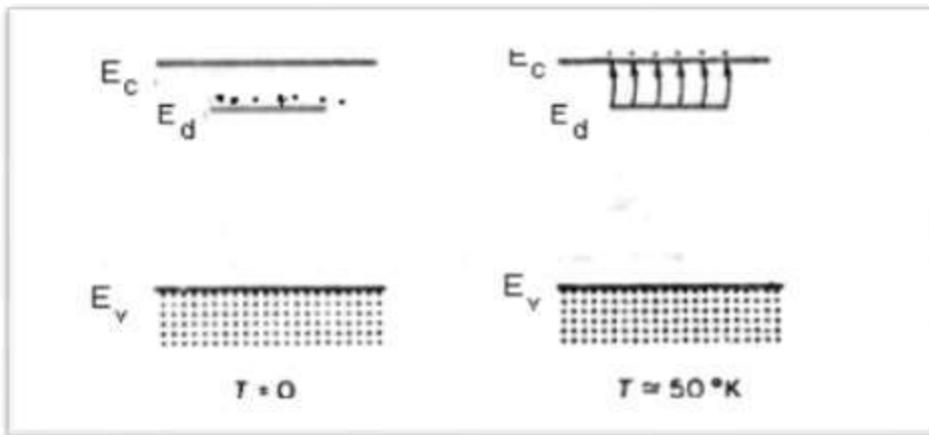
1.3- أنصاف النواقل المطعمة (اللاذاتية):

عملية تطعيم أنصاف النواقل تمكن من الحصول على خواص كهربائية وضوئية مميزة للنصف الناقل. مثل زيادة الناقلية. تتم هذه العملية بإضافة كمية قليلة ومتحكم بها وينسب قليلة (1-ذرة) من الشوائب المطعمة المناسبة هناك نوعين من أشباه الموصلات الغير نقية نوع سالب N ونوع موجب P [2,4,6,16].

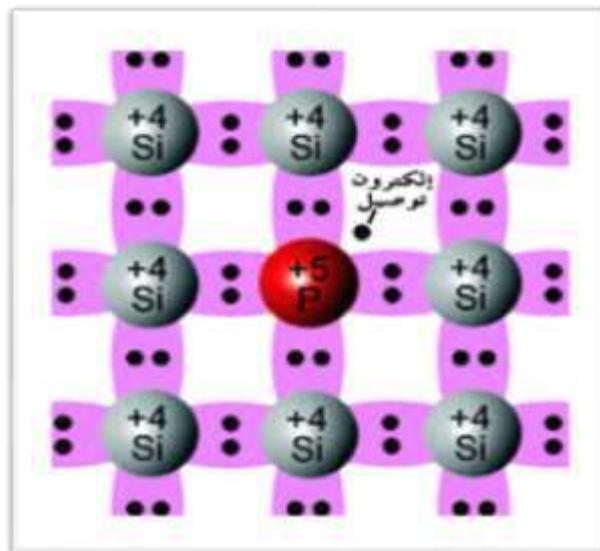
1.1.3- نصف الناقل من النوع n

هو نصف ناقل ذاتي كالسليكون Si أو الجرمانيوم مثلا ، أدخلت فيه شوائب من العمود الخامس في الجدول الدوري للعناصر (كالزرنيخ As أو الفسفور P أو الإيثمد و الأنتيموان Sb).

من المعلوم أن كل ذرة لعنصر في العمود الخامس كالزرنيخ As لها خمسة إلكترونات تكافؤ ، فعندما تدخل في شبكة Si البلورية تكفي أربعة منها لإكمال الروابط التكافؤية مع ذرات السليكون المجاورة الذي له أربعة إلكترونات تكافؤ ، ويبقى الإلكترون الخامس غير مرتبط بأي ذرة وبالتالي فهو إلكترون حر ، وذلك لأن طاقة ربطه بالذرة الأم صغيرة جدا . إذن هذا النوع موصل حتى عند درجة حرارة الصفر المطلق (0^0K) ، أما عند درجة حرارة الغرفة سنجد أن بعض إلكترونات التكافؤ قد تحررت من مدارها وكونت أزواجا من حاملات الشحن (إلكترون + ثقب) ، وتسمى الذرة الشائبة في هذه الحالة بالذرة الواهبة أو المانحة (doner) ويكون مستوى طاقتها والذي يسمى مستوى المانحة E_d على بعد قريب جدا أسفل حافة شريط التوصيل (الشكل 7) ، فمثلا أن مستوى المانحة (الزرنيخ) في حالة السليكون يقع على بعد $0.05e.v$ من حافة شريط التوصيل ولذلك فمن السهل إثارة الإلكترون وإنتقاله إلى شريط التوصيل حيث يساهم في نقل التيار الكهربائي و لذلك يسمى هذا النوع بالنوع السالب n ، تكون فيه كثافة الإلكترونات أكبر كثيرا من كثافة الثقوب المتولدة حراريا ، لذا تكون الإلكترونات في هذا النوع حاملات الشحنة الأكثرية ، كما تسمى الثقوب حاملات الشحنة الأقلية [2,4,6,16].



الشكل (3) : منح الإلكترونات من السوية المانحة إلى عصابة النقل



الشكل (4): يمثل تطعيم Si بالفوسفور P للحصول على نصف ناقل من النوع n

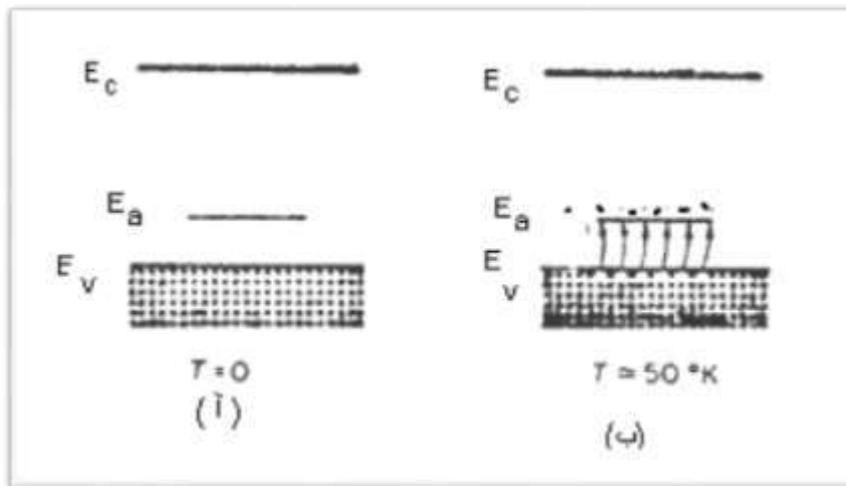
2.3.1 - نصف الناقل من النوع p

هو نصف ناقل ذاتي كالسليكون Si أو الجرمانيوم Ge ، أدخلت فيه شوائب من العمود الثالث في الجدول الدوري للعناصر (كالبورB أو الإنديوم In أو الغاليوم Ga أو الألمنيوم Al) .

عند إضافة شوائب من مواد ثلاثية التكافؤ إلى مادة السليكون أو الجرمانيوم النقي فإن الإلكترونات الثلاثة للمادة الشائبة في المدار الأخير ترتبط بروابط تساهمية وتبقى الرابطة الرابعة غير مكتملة مما يؤدي إلى تكوّن ثقب اهم في نقل التيار الكهربائي .

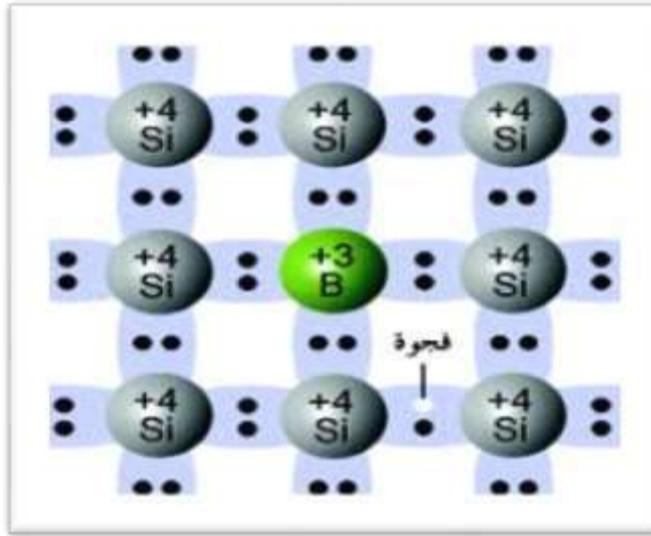
تسمى الذرة الشائبة في هذه الحالة الآخذة أو المتقبلة (Acceptor) ويكون مستوى طاقتها والذي يسمى مستوى الآخذة (E_a) قريب جدا من حافة شريط التكافؤ ، لذلك فإنه من السهل إنتقال الإلكترونات من شريط التكافؤ إلى مستوى الآخذة وترك ثقوب (حفر) في شريط التكافؤ.

يؤدي توالي ملؤها بالإلكترونات إلى المساهمة بصورة أساسية في توصيل التيار الكهربائي .فيكون مثلا مستوى الآخذة (بورون) في حالة السليكون أعلى من حافة شريط التكافؤ بحوالي (0.08 e.v).



الشكل(5) : أخذ الإلكترونات من سوية الآخذة إلى عصابة التكافؤ

إن عملية التطعيم بالشوائب الآخذة يمكن أن تخلق نصف ناقل كثافة الثقوب في شريط التكافؤ فيه أكبر بكثير من كثافة الإلكترونات في شريط النقل ، وبذلك تشكل الثقوب فيه حاملات الشحنة الأكثرية ، بينما تشكل الإلكترونات الحاملات الأقلية . ويسمى نصف الناقل المطعم بهذه الطريقة نصف الناقل من النوع p[1،2،6].



الشكل (6): يمثل تطعيم Si بالبور B للحصول على نصف ناقل من النوع P

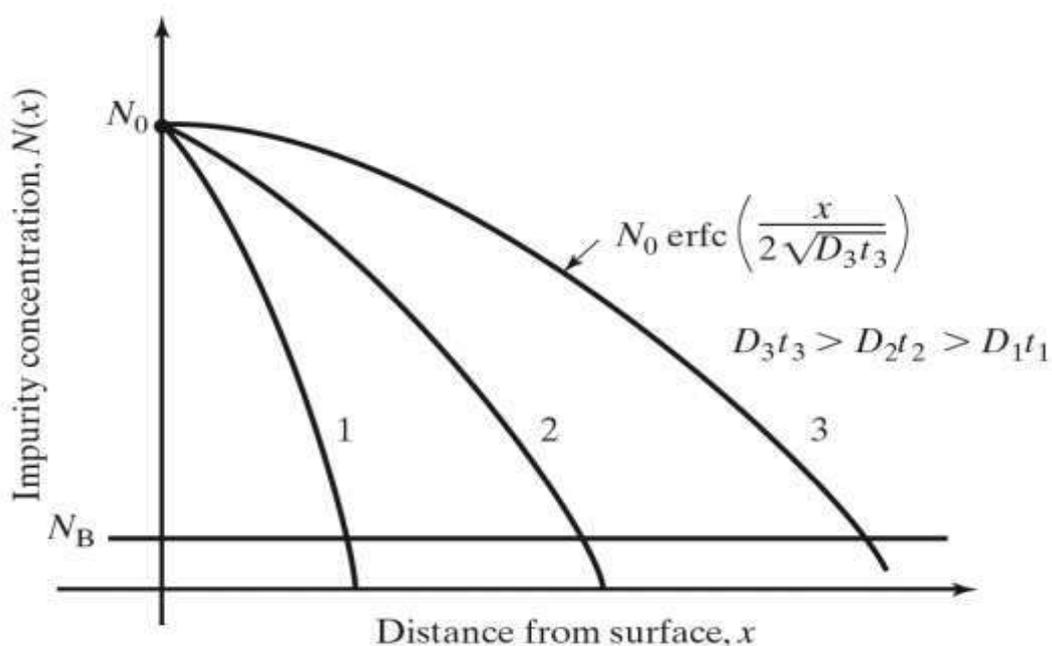
4.1. طرق التطعيم

هناك طريقتان هما الأكثر استعمالاً وشيوعاً مستخدمتان لتطعيم السيليسيوم هما الانتشار الحراري والغرس (الزرع) الأيوني حيث تعتمد هذه الأخيرة على ادخال كمية من الشوائب المطعمة متحكم بها عن طريق قذف العينة المراد تطعيمها بجزءة من الأيونات المسرعة والموجهة بواسطة حقل كهرومغناطيسي [8,9].

1.4.1- الانتشار الحراري

يتم التطعيم وفق هذه الطريقة على مرحلتين :

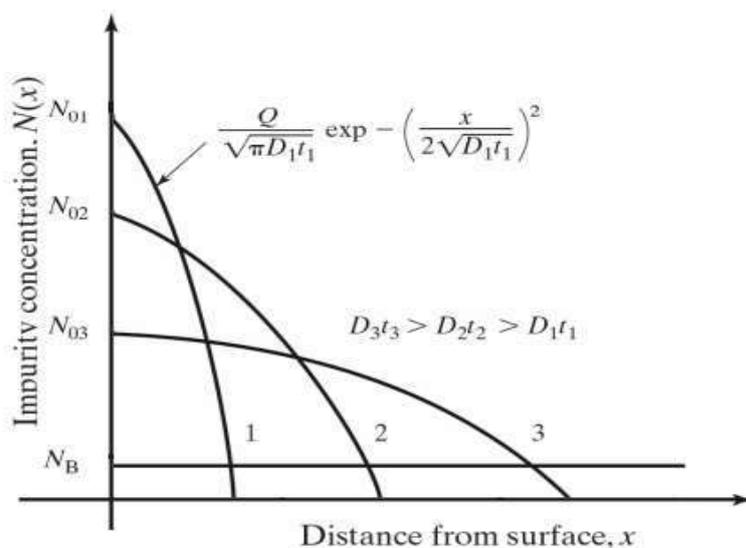
التموضع المسبق: حيث يتم ابقاء صفائح السيليسيوم في وسط مشبع بالشوائب المطعمة وبتركيز ثابت وهذا لمدة زمنية معينة وتحت درجة حرارة ثابتة فيحدث الانتشار على اعماق صغيرة مقارنة بسمك صفائح السيليسيوم. الشكل (7) يوضح منحنيات الانتشار في حالة التموضع المسبق [8,11].



الشكل (7): منحنى الانتشار في مرحلة التموضع المسبق

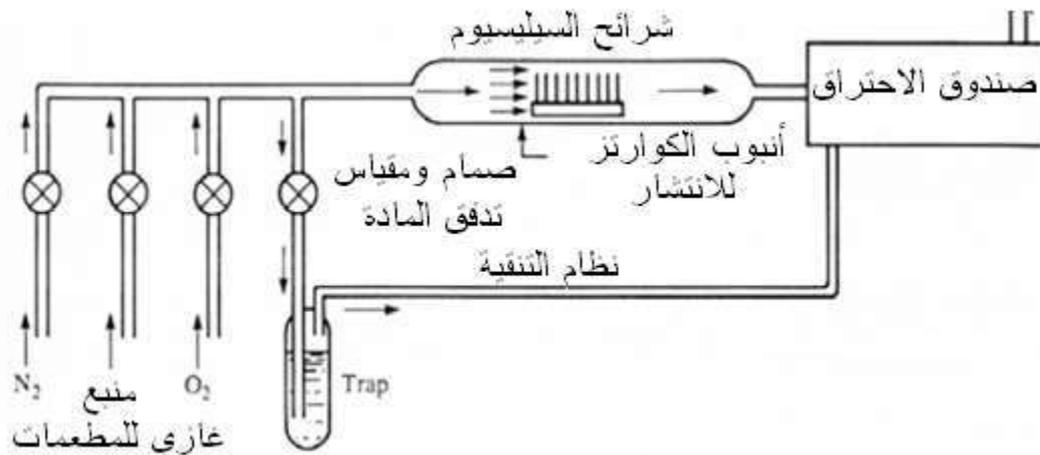
مرحلة التوزيع:

يقطع منبع الاشابة عن صفائح السيليسيوم ويتم اخضاعها الى درجات حرارة عالية لكي تصل الشوائب المطعمة الى عمق اكبر وتكون المنحنيات في الشروط الذاتية كما هو مبين في الشكل [11,8].



الشكل (8): منحنى الانتشار في مرحلة التوزيع

تتنوع مصادر الشوائب المطعمة منها ما هو غازي ومنها ما هو سائل ومنها ما هو صلب. الشكل أسفله يبين مخطط التجهيز الذي يسمح بتطعيم السيليسيوم انطلاقاً من منبع غازي.



الشكل (9) مخطط التجهيز المستخدم في التطعيم

الجدول 1-1 يبين منابع مطعمات النوع السالب والموجب [12]

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

تقنية التنشيط:

ان انتشار الشوائب الى اعماق المادة الحاملة لهذه الشوائب يستوجب تنشيطها من خلال اعطائها طاقة كافية لذلك وحسب انحلالها الاعظمي داخل المادة المنتشر فيها ، لهذا طور الخبراء في هذا الصدد عدة تقنيات تمكن من ذلك مثل التلدين الحراري السريع والتلدين بالليزر [8،10،13،14].

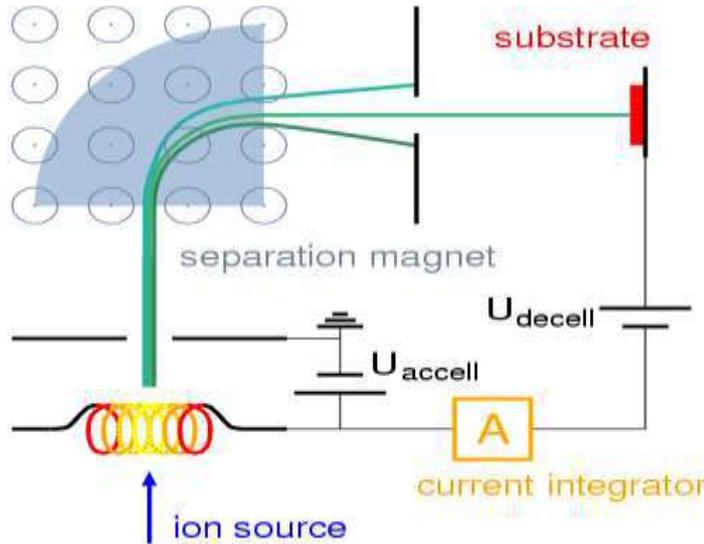
2.4.1. الغرس الايوني :

.الغرس الايوني :

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، وصددها 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.



الشكل (10) مخطط يبرز آلية الغرس الايوني .

يتألف جهاز غرس الأيونات بشكل نمطي من مصدر للأيونات، حيث تنتج الأيونات المراد إضافتها، ومن مسرع جسيمات، الذي يقوم بتسريع الأيونات ضمن حقل كهربائي ساكن (إلكتروستاتيكي) إلى سرعات ذات طاقة مرتفعة، ومن الحجره الهدف، حيث مكان اصطدام الأيونات بالجسم الصلب الهدف غالباً ما يوصل السطح الهدف بجهاز من أجل كشف وتحديد الشحنات المتراكمة من الأيونات المغروسة، مما يمكن من قياس الجرعة المعطاة بشكل مستمر، و إيقاف العملية عند مقدار الجرعة المرغوب فيه [7،15].

مراجع الفصل الأول

- [1] الإلكترونيات الأساسية، د-محمد قعقع، جامعة دمشق، ص299-308، 2015.
- [2] أشباه الموصلات ترجمة للفصل الأول كتاب تقريرات دوائر الترانزستور، مالفينو، أسامة عمر العشي، ص1.
- [3] بن بادة خولة، مذكرة لنيل شهادة الماستر ل، م، د، "دراسة بالحاكاة لانتشار الفوسفور في الجيرمانيوم"، الجزائر-ورقلة، 2019.
- [4] Charles Kittel", Physique de l'état solide", edition, page , (220-235537-555()2003) BORDAS, Paris (1983)
- [5] S.S. AL-RAWI, S.J.SHAKIR and Y.N.HUSAN "Solid state physics ", publishing, of MousalUniversitey Arabic Version, Mousal(,1990)
- [6] هامل عبد الوهاب، مذكرة لنيل شهادة دكتوراة دولة، "تطوير نموذج السطح المسنن للخلايا الشمسية للحصول على مردود طاقي عالي"، الجزائر-عنابة، 2010.
- [7] د. عبد القادر سويقات، أطروحة دكتوراة، "دراسة لنصف الناقل الجيرمانيوم المطعم للاستعمال في المكونات الإلكترونية الضوئية"، الجزائر-ورقلة، 2016.
- [8] عبد القادر سويقات، مذكرة لنيل شهادة الماجستير، "نمذجة ومحاكاة انتشار المطعمات في السيليسيوم والجيرمانيوم احاديي البلورة"، الجزائر-ورقلة، 2012.
- [9] Laurent .Montes :<Techniquesdedopage> , ENSERG /ENSPG/ENSEEG-OPTION 'Dispositif et Microsystemes(2007).'
- [10] 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) .
- [11] Scoten W.Jones:<Diffusion in Silicon>, IC Knowledge LLC, copyright (2000).
- [12] M.Razeghi:<Technology of Quantum Devices>, Page60 Springer Science, LLC (2010).
- [13] Ali M.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).
- [14] مكرم عبد المطلب :<التلدين الحراري التقليدي للنبيطة الهجينة النوع CdO/S المحضرة بطريقة الترسيب باليزر النبضي>، مجلة الهندسة والتكنولوجيا . بغداد المجلد. 27. العدد 17. (2009).

[15] Mark Goorsky:<ION IMPLANTATION>, InTech(2012).

[16] إبراهيم عهد غدیر و تجانی زهرة. مذكرة تخرج لنیل شهادة أستاذ تعليم ثانوي، المدرسة العليا للأساتذة-ورقة 2020.

الفصل الثاني:

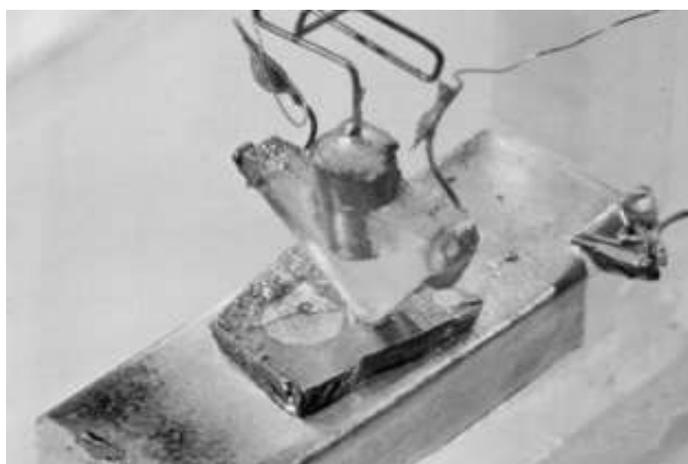
الجيرمانيوم ومميزاته

تمهيد

تعرضنا في الفصل السابق إلى أنصاف النواقل ومميزاتها ، وفي هذا الفصل سنتطرق إلى نموذج من نماذج أنصاف النواقل المتداولة وهو عنصر الجيرمانيوم ، حيث سنعرج إلى تواجده في الطبيعة واكتشافه وطرق تنقيته ، كما سنتناول أيضا خواصه و المتمثلة في البنية البلورية ، الفاصل الطاقوي و تركيز حاملات الشحنة.

1.2- إكتشاف الجيرمانيوم

في عام 1864 ، افترض John Newlands وجود عنصر من شأنه أن يكون وسيطا بين السيليكون والقصدير أثناء إنشاء الجدول الدوري للعناصر ، في عام 1871 ، تم التنبؤ بالخصائص البارزة للعنصر غير المكتشف من طرف العالم Dmitri Mendeleev ، الذي أطلق عليه اسم إيكاسيليكون (ما وراء السيليكون) في عام 1886، تم استخلاص العنصر من خام الأرجرديت argyrodite من طرف العالم Clemens Winkle و أطلق عليها اسم الجيرمانيوم في إشارة إلى بلده ألمانيا ، وهو أيضا المكان الذي اكتشفه فيه . لقد مر أكثر من نصف قرن بعد عزل الجيرمانيوم قبل استخدامه التجاري لأول مرة . مع بداية الحرب العالمية الثانية طورت الصمامات ثنائية من الجيرمانيوم بهدف استخدامها في الرادارات، وفي سنة 1947 تم اختراع أول ترانزستور و عدسات الأشعة تحت الحمراء سنة 1949 [1-5].



الشكل (11): أول الترانزستور صنع في مختبراتيل في عام 1948 [2]

- تواجده في الطبيعة

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

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

1	H																	He	
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne	
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar	
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ge	As	Se	Br	Kr		
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe	
6	Cs	Ba	Lanthanides	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn	
7	Fr	Ra	Actinides																
Lanthanides			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
Actinides			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr		

الشكل (12): يوضح موقع الجيرمانيوم في الجدول الدوري [7]

الجدول 2- الخواص الفيزيائية للجيرمانيوم: [1,4,7,8]

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

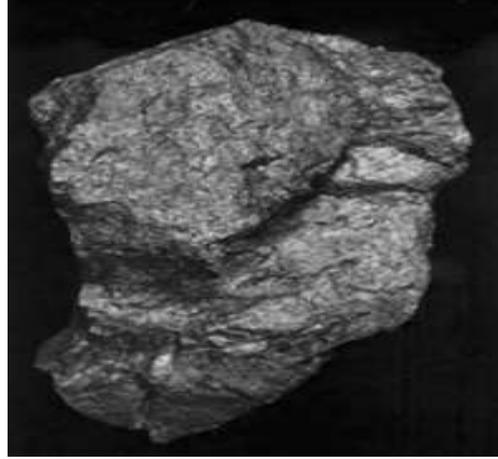
3.2- معادن الجيرمانيوم

يعتبر الجيرمانيوم من العناصر النادرة في الطبيعة (% 3-10 من وزن القشرة الأرضية) فهو لا يتواجد نقيا بل ممزوجا في عناصر أخرى بشكل خامات، أغلبها متواجدة بأوكرانيا وروسيا والصين، تستغل هذه الخامات بغية الحصول منها على الجيرمانيوم

[3.5]

الجدول (3) - يوضح بعض خامات الجيرمانيوم [1,4]

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



الشكل (13): يوضح معدن رينيريت renierite [2]

4.2- تنقية الجيرمانيوم

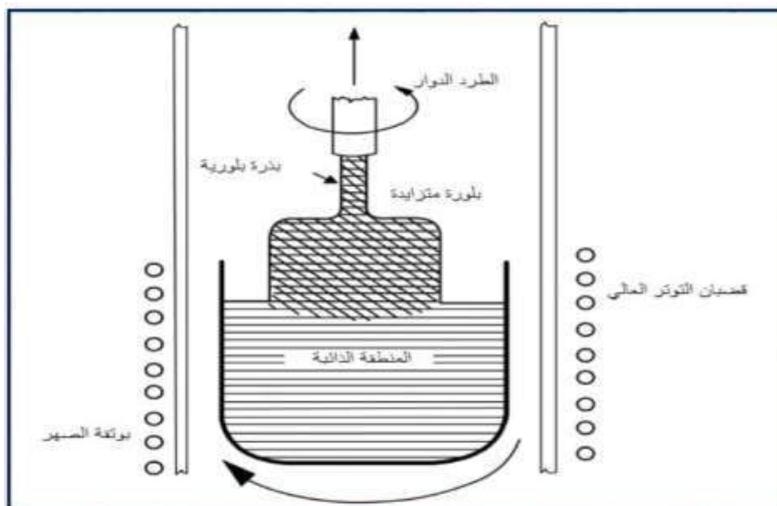
للحصول على سبائك الجيرمانيوم أحادية البلورة وذات درجة عالية من النقاء. يمكن الإعتماد على طريقة (Czochralski) (Cz) أو طريقة الصهر النطاقي Float zone (Fz).

1.4.2- طريقة تشوخرالسكي (Czochralski):

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

وسنوضح هذه الطريقة أكثر خلال تنقية الجيرمانيوم ، حيث عند صهره في بوتقة داخل فرن يتم سحبه انطلاقا من الوسط ببطء أحادي البلورة ، وذلك بالتزامن مع إبقاء البلورة في حالة دوران من أجل تحقيق تجانس الحمام ومراقبة السطح البيئي الصلب - السائل . ويتوقف قطر البلورة النامية على درجة حرارة المصهور ومعدل سحب البلورة ، حيث يقل قطر البلورة عندما يرتفع معدل سحبها من المصهور ، كما يقل إذا ارتفعت درجة حرارة المصهور .

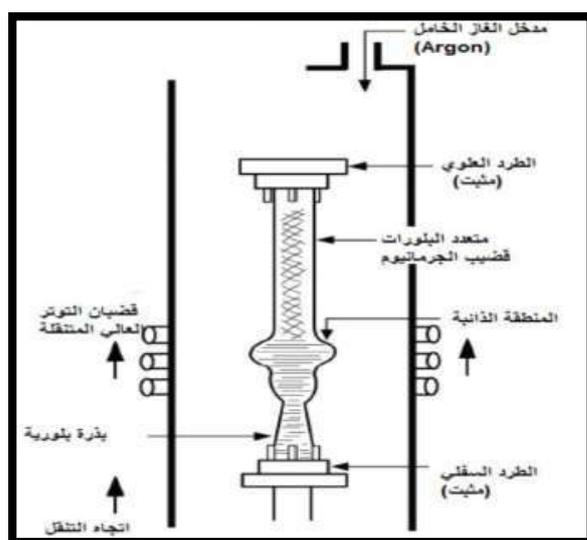
تتميز هذه الطريقة بأن البلورة النامية تكون على درجة عالية من الجودة ، كما تمكن من إنشاء بلورات خالية تقريبا من العيوب البلورية الشائعة عند اتباع هذه الطريقة ، من بين هذه البلورات الجيرمانيوم [10،13،12،3،11].



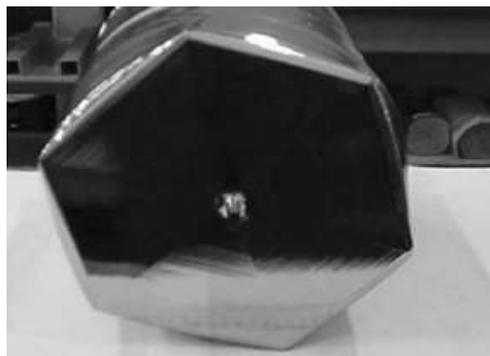
الشكل (13) : يوضح طريقة (Czochralski) [5]

2.4.2 - طريقة الصهر النطاقي Float zone

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



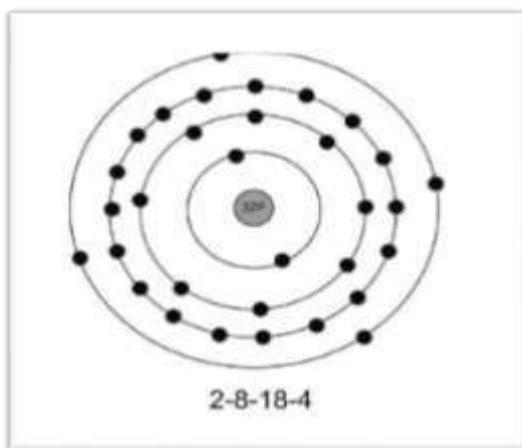
الشكل (15) : يوضح طريقة الصهر النطاقي [5]



الشكل (16): جيرمانيوم أحادي البلورة [2]

5.2- البنية البلورية

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

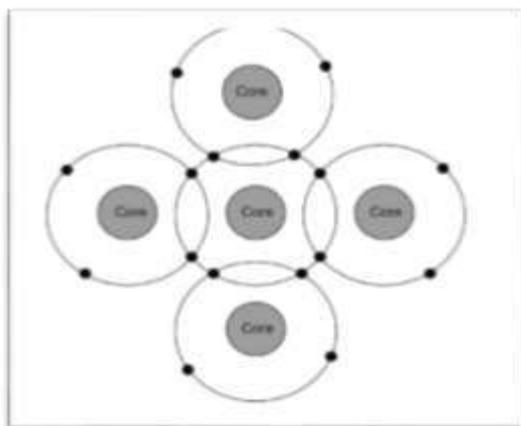


الشكل (17): يوضح ذرة الجيرمانيوم [9]

2. 1.5- التكوين البلوري

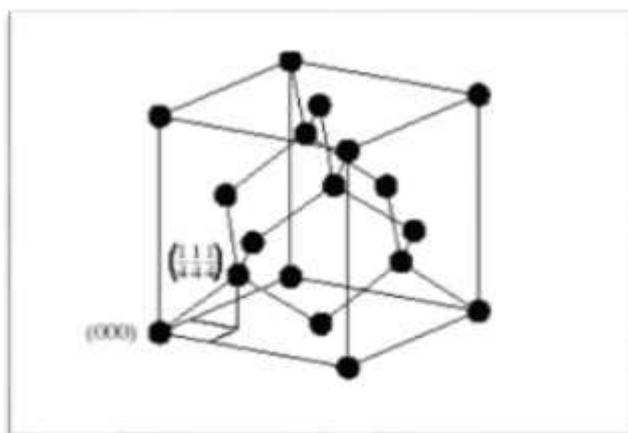
بما أن الغلاف الخارجي لذرة الجيرمانيوم يحتوي على أربعة إلكترونات ، فهذا يعني أن الغلاف ينقصه أربعة إلكترونات حتى يصل إلى حالة التشبع (8 إلكترونات) . ومن حقيقة أن ذرات الجيرمانيوم أثناء ارتباطها لتكوين المادة فإن غلافها الخارجي سيحتوي

على ثمانية إلكترونات ، فإن أربعة من هذه الثمانية ستكون إلكترونات تساهمية من الذرات الأربعة المجاورة . هذا الترتيب للذرات المتجاورة يدعى بالتكوين البلوري. في بلورة الجيرمانيوم النقي تكون كل ذرة محاطة بأربعة ذرات مجاورة والتي في الحقيقة تتشارك بالإلكتروناتها مع الذرة المركزية [9] كما هو مبين في الشكل.5.



الشكل (18) : يوضح الذرات بداخل البلورة [9]

يتبلور الجيرمانيوم هيكل الماس المكعب المرتبط تساهمياً كما هو موضح في الشكل(6). تتكون الشبكة البلورية من شبكتين مكعبتين متمركزتي الأوجه (CFC) – Face cubccentred ومتداخلتين بحيث تكون كل منهما مزاحة في إتجاه قطر الخلية المكعبية بمقدار ربع (1/4) طول القطر . ويمكن إعتبارها شبكة مكعبية متمركزة الأوجه ولها قاعدتان ، إحداها عند نقطة الأصل (0,0,0)، والأخرى ثابت الشبكة $a=5.66 \text{ \AA}$. كل خلية أولية لشبكة الماس تحتوي على 8 ذرات ، ويحيط بكل ذرة أربع ذرات (رقم التناسق) مرتبطة مع بعضها بروابط تكافؤية [3, 5, 8, 10].



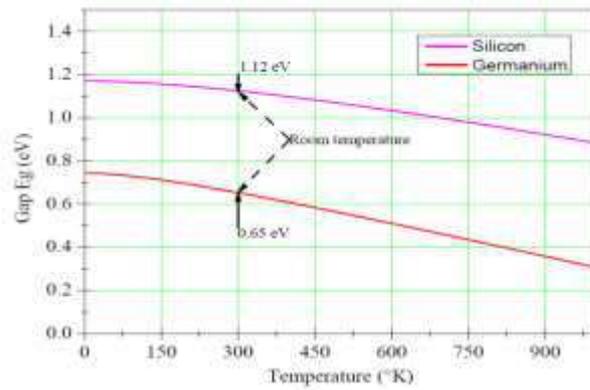
الشكل (19) : رسم تخطيطي يوضح البنية البلورية للجيرمانيوم [8]

6.2- الفاصل الطاقي للجيرمانيوم

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

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

الشكل (11) يوضح مقارنة بين تغيرات الفاصل الطاقي للجيرمانيوم والفاصل الطاقي للسيليسيوم بدلالة درجة الحرارة [16] .



الشكل (20) : مقارنة بين تغيرات الفاصل الطاقي للجيرمانيوم والسيليسيوم بدلالة درجة الحرارة .

7.2- تركيز حاملات الشحنة الذاتية

معرفة كثافة حاملات الشحنة في نصف الناقل يعد ضروريا لمعرفة خواصه الكهربائية . في نصف الناقل تحدث عملية معاكسة

لعملية الإثارة الحرارية للالكترونات، الالكترونات المنتقلة من عصابة النقل Bc تتحد مع الثقوب في عصابة التكافؤ Bv مما

يؤدي إلى خفض ناقلية النصف الناقل. تكون احتمالية الاتحاد متناسبة مع عدد الالكترونات الحرة في Bc وعدد الثقوب الحرة في

Bv . عند درجة الحرارة T و بين عمليتي الإثارة و الاتحاد توجد حالة توازن ينتج عنها تركيز معين لحاملات الشحنة تعطى وفق العلاقات التالية [16,14,3]:

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

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

ومن قانون فعل الكتلة نجد :

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

في الحالة الذاتية تكون :

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

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

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

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

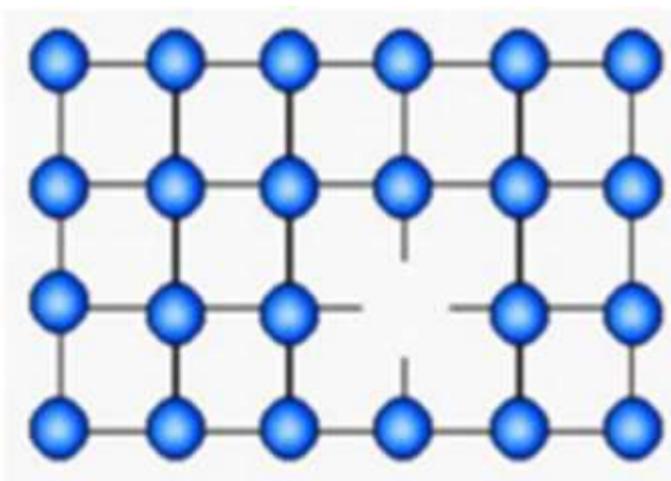
تعطى كثافة حاملات الشحنة الذاتية للجيرمانيوم وفق العلاقة التالية [15,3]:

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

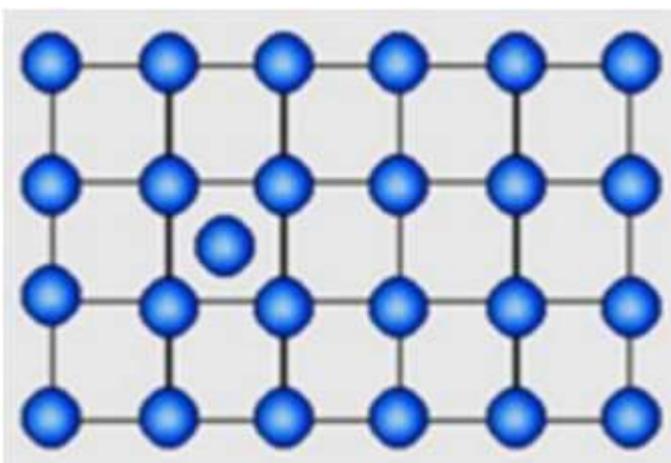
8.2- العيوب النقطية للجيرمانيوم

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

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



الشكل (21): يوضح تواجد الفجوة داخل الشبكة البلورية



الشكل (22): يوضح تواجد الفجوة داخل الشبكة البلورية

1.8.2 تركيز العيوب في حالة التوازن

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

ويكون تركيز العيب النقطي c_x في حالة التوازن الترموديناميكي :

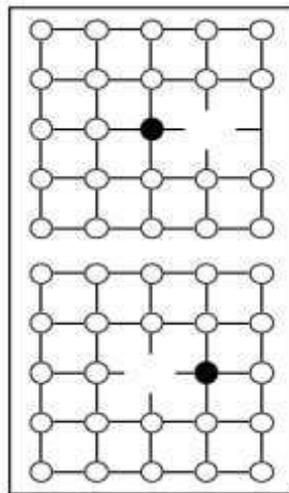
$$c_x = c_s \exp \left[-\frac{\Delta G_x^f}{KT} \right] \quad (8.2)$$

حيث c_s ، ΔG_x^f هما على الترتيب كثافة المواقع في الشبكة البلورية والطاقة الحرة لتشكيل العيب النقطي.

إن العيوب النقطية لها أهمية بالغة من وجهة النظر التكنولوجية والعلمية لدورها في تحفيز المطعومات على الانتشار أثناء عملية تطعيم النصف ناقل. في حالة الأنتيموان الانتشار يتم عبر الفجوات وهو ما يعرف بالآلية الفجوية

9.2 آلية الانتشار المجهرية للأنتيموان في الجيرمانيوم

ينتشر الأنتيموان في الجيرمانيوم وفق الآلية الفجوية (vacancy mechanism)، حيث يعتمد هذا الانتشار على وجود الفجوات (الشكل 21). بوجود فجوة في أحد مواضع الجوار الأقرب تنتقل المطعمة المتواجدة في الموقع الاستبدالي الى موقع الفجوة المجاور. تعرف هذه الآلية بالتبادل البسيط. في حالة وجود قوة تجاذب بين المطعمة والفجوة يبقيان مرتبطين مع بعضهما البعض و يشكلان ثنائية فجوة-مطعمة. هذه الثنائية تنتقل كمركب واحد في الشبكة البلورية وهو ما يدعى بالانتشار بالثنائيات [3].



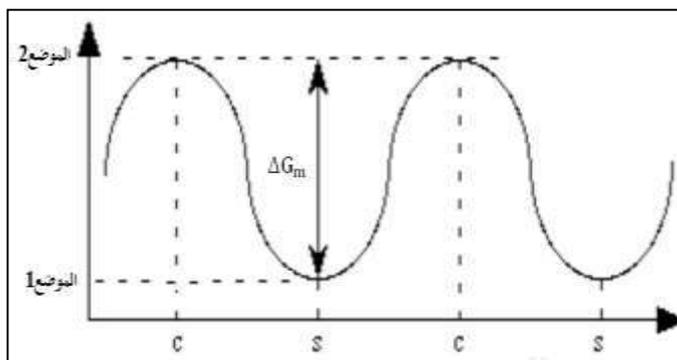
الشكل (23): مخطط يبرز الآلية الفجوية

10.2 معامل الانتشار الذاتي :

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

1.10.2 الدراسة النظرية لمعامل الانتشار :

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



الشكل (24): الحاجز الكموني أثناء الانتقال من موضع الى آخر

ΔG_m الطاقة اللازمة لاجتياز الحاجز للوصول الى الموضع 2 الشكل (27).

يرتبط معامل الأنتشار في حالة كون الانتشار يكون محفزا بالفجوات ، بتواتر القفز ν بالعلاقة التالية [3]:

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

يمثل a بعد الجوار الاقرب و f معامل الارتباط و ν تواتر القفز. حيث تواتر القفز :

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

ν_V تواتر القفز للفجوة ويساوي :

$$v_v = v_0 \exp\left[-\frac{\Delta G_v^m}{KT}\right] \quad (11.2)$$

P_v هي احتمال وجود فجوة في الموضع المجاور:

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

في العلاقتين (3.3) و(4.3) تمثل: ΔG_v^m طاقة هجرة الفجوة

E_{AV} تمثل طاقة الارتباط بين الفرد المنتشر والفجوة

C_s كثافة المواقع في الشبكة البلورية

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

C تركيز الفجوة عند التوازن التيرموديناميكي وتعطى بالعلاقة التالية:

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

إنطلاقاً من العلاقات السابقة نحصل على مايلي:

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

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

عندئذ يكتب معامل الانتشار على النحو التالي:

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

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

تمثل: ΔH_x^m انطالبي هجرة العيب النقطي

ΔS_x^m انطروبي هجرة العيب النقطي

ΔH_x^f انطالي تكون العيب النقطي

ΔS_x^f انطرويي تكون العيب النقطي

وتكون عبارة معامل الانتشار من الشكل :

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

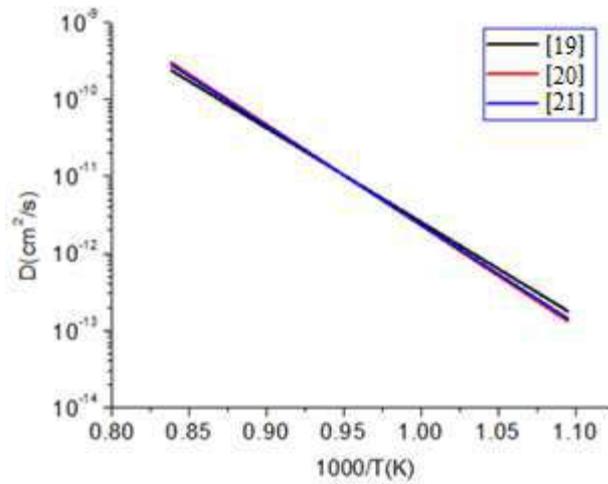
يسمى D_0 الحد الأنطروييوي E طاقة التنشيط حيث:

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

يمثل المنحنى البياني الممثل لتغيرات $\log D = f\left(\frac{1}{T}\right)$ خطا مستقيم ميله $-k/E$ ونقطة تقاطعه مع محور الترتيب تمثل $(D) \log_0$.

11.2 معامل انتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم:

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



الشكل (25): يمثل تغيرات معامل انتشار Sb في الجيرمانيوم حسب المراجع المذكورة

الجدول (4): قيم الحد الأنطروبييل Sb وطاقة التنشيط في الجيرمانيوم

المطعمة	$D_0(\text{cm}^2\text{s}^{-1})$	E(eV)	المرجع
Sb	4	2.42	[19]
Sb	28.5	2.598	[20]
Sb	16.7	2.55	[21]

مراجع الفصل الثاني

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

- [11]E. Talik and M. Oboz , " Czochralski Method for Crystal Growth of Reactive Intermetallics" , Institute of Physics , University of Silesia , Poland ,2013.
- [12]D.Cochet-Muchy," Growth of piezoelectric crystals by czochralski method ", journal de physique IV , jpa-00252473.1994.
- [13]T. Taishi ,et all,"Improved Czochralski Growth of Germanium Single Crystals from a Melt Covered by Boron Oxide",ACTA PHYSICA POLONICA A. 124(2),231 (2013)
- [14] الدكتور محمد قعقع , الإلكترونيات الأساسية (الإلكترونيات 1) , جامعة دمشق كلية العلوم
- [15] عبد القادر سويقات ، مذكرة مقدمة لنيل شهادة الماجستير بعنوان نمذجة ومحاكاة إنتشار المطعمات في السيليسيوم والجيرمانيوم أحادي البلورة ، جامعة قاصدي مرباح ورقلة ، 2012م
- [16]A. Bouchekka. these de doctorat,"Adsorption of BSA Protein on silicon,Germanium and Titanium Dioxide Investigated by In Situ ATR-IR Spectroscopy ",université d'oran (2013)
- [17] هامل عبد الوهاب ، مذكرة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه دولة بعنوان تطوير نموذج السطح المسنن للخلايا الشمسية للحصول على مردود طاقي عالي ، جامعة باجي مختار – عنابة ، 2009 / 2010 م.
- [18] د.سعود بن حميد اللحياني ، فيزياء الجوامد ، جامعة أم القرى ، كلية العلوم التطبيقية ، شعبة الفيزياء الطبية.
- [19]B.Boltaks: « Diffusion et Défauts Ponctuels Dans Les Semi-conducteurs » , Page(119,181) , Editions Mir. Moscou, (1977).
- [20]Thomas Canneaux, “Etude de la diffusion des dopants usuels dans le germanium”,Thèses Doctorat de l’Université de Strasbourg (2009).
- [21]S. Brotzmann and H. Bracht: «Intrinsic and extrinsic diffusion of phosphorus, arsenic,and antimony in germanium», Appl. Phys. **103**, 033508 (2008).

الفصل الثالث:

نمذجة ومحاكاة انتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم

تمهيد :

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

1.3 نمذجة انتشار الأنتيموان:

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

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

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

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

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

α يمثل عامل التناسب التربيعي بين معاملاً انتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم وكثافة الإلكترونات الحرة n .

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

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

عبارة التدفق الأنتيموان في الجيرمانيوم تكتب كالتالي :

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

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

تعطى قيمة u وفق العبارة التالية [3]:

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

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

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

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

من جهة ثانية حسب علاقة اينشتاين [3]:

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

بالتعويض في عبارة j نجد:

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

العبارة الأخيرة يمكن كتابتها على النحو التالي :

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

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

بعد الاشتقاق والتعويض عبارة التدفق يعبر عنها كالتالي :

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

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

المقدار h يدعى بمعامل التسريع الكهربائي حيث :

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

المقدار hD يدعى بمعامل الانتشار الفعال :

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

عندئذ معامل الانتشار الفعال يمكن كتابته على النحو التالي :

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

والتدفق يكتب بالشكل:

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

2.3 القانون الثاني لـ فيك:

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

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

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

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

3.3 محاكاة منحنيات الانتشار

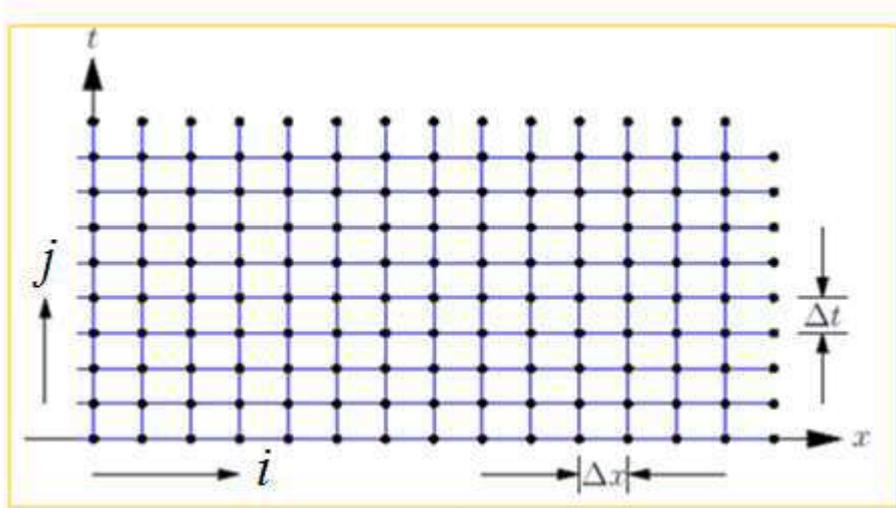
محاكاة منحنيات انتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم أنجزناها بواسطة برنامج بلغة الفورترن. يعتمد هذا البرنامج على الحل العددي لقانون فيك الثاني وذلك بتجزئة مجال الانتشار إلى N جزء متناهي السمك و تعويض المشتقات الجزئية في المعادلة (20.3) بتقريبات الفروق المتناهية التالية:

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

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

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

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



الشكل (26): يوضح تجزئة البعد وزمن الانتشار.

حيث i, j على الترتيب دليلا البعد والزمن Δx و Δt هما على الترتيب الخطوة البعدية والخطوة الزمنية. انطلاقا من المعادلات

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

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

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

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

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

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

انطلاقا من المعادلات (25,3)،(26,3)،(27,3) نحصل على نظام مصفوفي ثلاثي قطري (tridiagonal matrix

systems) يربط التراكيز في اللحظة $j\Delta t$ بالتراكيز في اللحظة $(j-1)\Delta t$ من الشكل $\mathbf{Bc}=\mathbf{a}$ حيث:

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

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

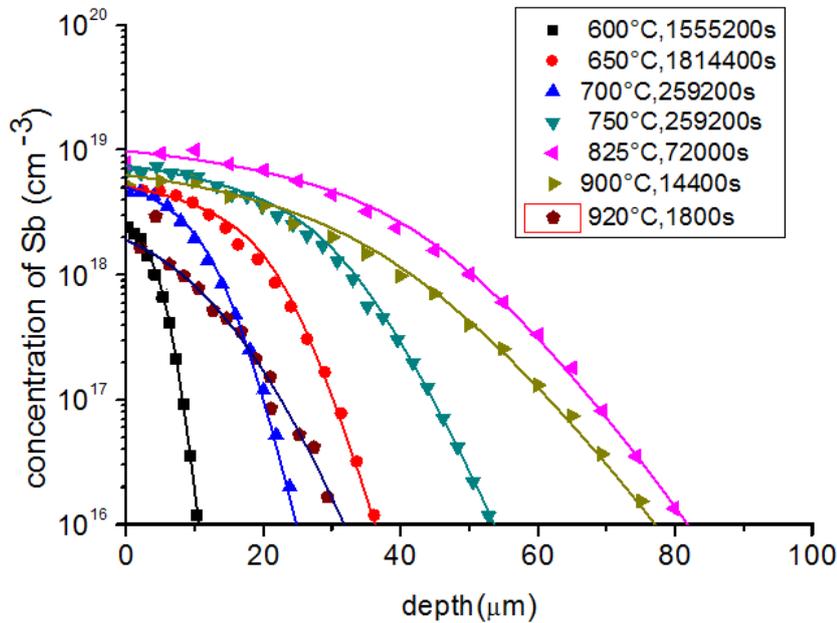
الحل العددي للنظام المصفوفي الثلاثي القطري الذي تحصلنا عليه، تم باستخدام خوارزمية توماس (Thomas Algorithm)، والتي تقوم أساساً على طريقة التفكيك (LU decomposition Method).

خلال محاكاة المنحنيات التجريبية [4] اخترنا قيم عامل التناسب التربيع وقيم تركيز حاملات الشحنة الذاتية الموافقة لدرجة حرارة الانتشار التي تحقق تطابق منحنيات المحاكاة مع المنحنيات التجريبية.

4.3 نتائج ومناقشة:

1.4.3 محاكاة المنحنيات التجريبية و مقارنتها :

يوضح الشكل (27) المنحنيات التجريبية و المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة لانتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم عند درجة حرارة ومدة زمنية معينتين. نلاحظ مدى تطابق منحنيات المحاكاة مع منحنيات التجريبية مما يبين أن نموذج الانتشار بالفجوات الثنائية الشحنة السالبة يصف بدقة انتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم



الشكل (27): المنحنيات المتحصل عليها بالمحاكاة (الخطوط المستمرة) والمنحنيات التجريبية [4] لانتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم

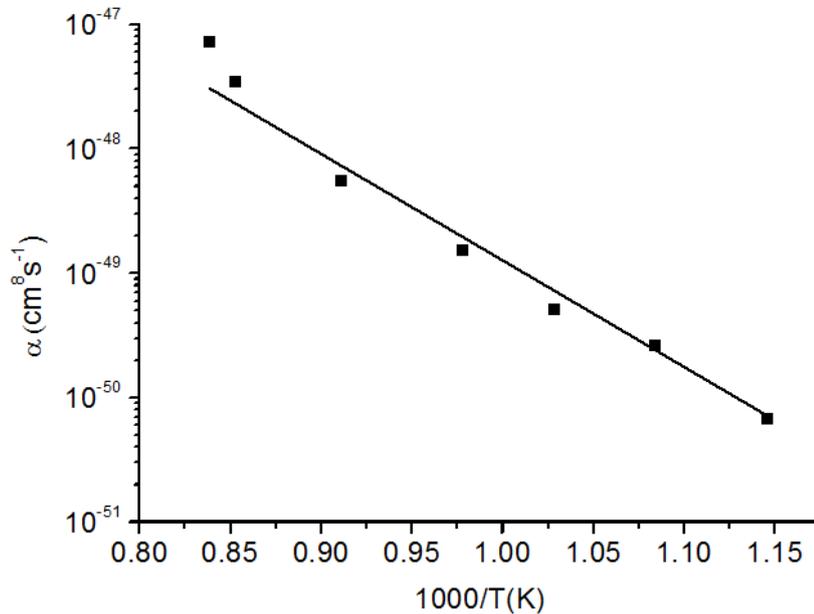
الجدول (5) : قيم التركيز الابتدائي على السطح ، معامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة انتشار الانثيموان

في الجيرمانيوم المستعملة في المحاكاة .

المطعمة	$C_0(\text{cm}^{-3})$	t(s)	T (°c)	$n_i(\text{cm}^{-3})$	$\alpha(\text{cm}^8\text{s}^{-1})$
Sb	2.4×10^{18}	1555200	600	2.20×10^{18}	6.87×10^{-51}
Sb	5.1×10^{18}	1814400	650	3.10×10^{18}	2.68×10^{-50}
Sb	5×10^{18}	259200	700	4.30×10^{18}	5.17×10^{-50}
Sb	7.5×10^{18}	259200	750	5.00×10^{18}	1.56×10^{-49}
Sb	9.8×10^{18}	72000	825	7.65×10^{18}	5.67×10^{-49}
Sb	6.3×10^{18}	14400	900	7.00×10^{18}	3.49×10^{-48}
Sb	1.9×10^{18}	1800	920	6.70×10^{18}	7.38×10^{-48}

2.4.3 عامل التناسب التربيعي :

إنطلاقاً من معطياتنا المستخدمة في المحاكاة استطعنا رسم المنحنى البياني الممثل لتغيرات عامل التناسب التربيعي بين انتشارية الأنثيموان في الجيرمانيوم وكثافة الالكترونات الحرة بدلالة مقلوب درجة الحرارة كما هو مبين في الشكل (28).



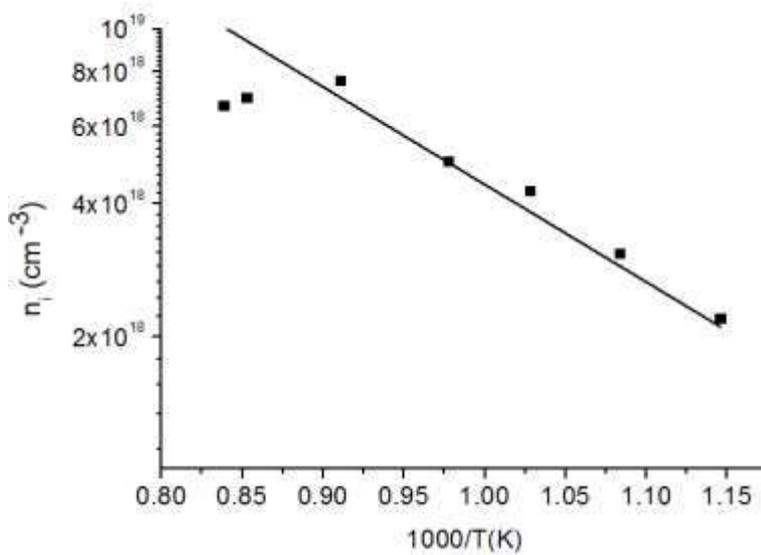
الشكل (28) : تغيرات عامل التناسب التربيعي مع مقلوب درجة الحرارة.

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

$$\alpha = 4.6 \times 10^{-41} \exp\left(\frac{-1.7eV}{kT}\right) \text{ (cm}^8 \cdot \text{s}^{-1}\text{)} \quad (28.3)$$

3.4.3 حاملات الشحنة الذاتية:

المنحنى المبين في الشكل 29 يمثل تغيرات تركيز حاملات الشحنة الذاتية n_i بدلالة مقلوب درجات الحرارة، المتحصل عليه من معطياتنا المستخدمة في المحاكاة والمبينة في الجدول (5).



الشكل (29): تغيرات تركيز حاملات الشحنة الذاتية n_i بدلالة مقلوب درجات الحرارة

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

$$n_i = 7.3 \times 10^{20} \exp\left(\frac{-0.44eV}{kT}\right) \text{ (cm}^{-3}\text{)} \quad (29.3)$$

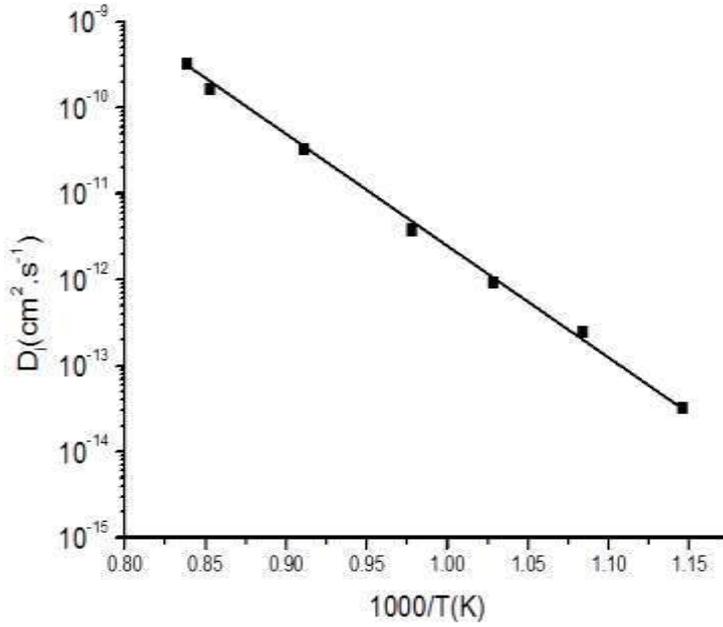
4.4.3 معامل الانتشار الذاتي:

في حالة الانتشار الذاتي يكون لدينا

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

الجدول (6) : قيم معامل الانتشار الذاتي الموافقة لدرجات حرارة انتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم

T(°c)	600	650	700	750	825	900	920
$D_i(\text{cm}^2.\text{s}^{-1})$	3.33×10^{-14}	2.58×10^{-13}	9.56×10^{-13}	3.90×10^{-12}	3.32×10^{-11}	1.71×10^{-10}	3.31×10^{-10}



الشكل (30) : تغيرات معامل الانتشار الذاتي بدلالة مقلوب درجات الحرارة

يتغير معامل الانتشار الذاتي بدلالة درجة الحرارة وفق العلاقة التالية:

$$D_i = 24.5 \times \exp\left(\frac{-2.58\text{eV}}{kT}\right) \quad (\text{cm}^2.\text{s}^{-1}) \quad (31.3)$$

حيث طاقة تنشيط الأنتيموان في الجيرمانيوم

$$E = 2.58\text{eV}$$

مراجع الفصل الثالث

- [1] S. Brotzmann and H. Bracht: «Intrinsic and extrinsic diffusion of phosphorus, arsenic, and antimony in germanium», Appl. Phys. **103**, 033508 (2008).
- [2] Daniel Mathiot , " Dopage et diffusion dans le Silicium", In ESS, UMR 7163 , Laboratoire Commun CNRS-ULP , 2004.
- [3] J.R.King, and C.P. Please, " Diffusion of Dopants in Crystalline Silicon : An Asymptotic Analysis " , Int. J. of Appl. Math. 37, 185-197. 1986.
- [4] S. Brotzmann and H. Bracht, " Intrinsic and extrinsic diffusion of phosphorus , arsenic, and antimony in germanium " , Appl, Phys .103. 033508 .2008.

الخاتمة

الخاتمة العامة

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

فبعد نمذجة ومحاكاة منحنيات الانتشار التجريبية للأنتيموان في الجيرمانيوم في مجال درجة حرارة محصور بين 600-920 درجة مئوية، بالآلية الفجوية آخذين بعين الاعتبار مساهمة الفجوات ثنائية الشحنة السالبة توصلنا الى مايلي:

- نموذج الانتشار بالفجوات ثنائية الشحنة السالبة يصف بدقة انتشار الأنتيموان في الجيرمانيوم.

- تتناسب انتشارية الأنتيموان في الجيرمانيوم تربيعيا مع كثافة الالكترونات الحرة .

- يرتبط كل من عامل التناسب التربيعي، تركيز حاملات الشحنة و معامل الانتشار الذاتي بدرجة الحرارة وفق العلاقات المبينة أدناه :

$$\alpha = 4.6 \times 10^{-41} \exp\left(\frac{-1.7eV}{kT}\right) \text{ (cm}^8 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

$$n_i = 7.3 \times 10^{20} \exp\left(\frac{-0.44eV}{kT}\right) \text{ (cm}^{-3}\text{)}$$

$$D_i = 24.5 \times \exp\left(\frac{-2.58eV}{kT}\right) \text{ (cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

-طاقة تنشيط الأنتيموان في الجيرمانيوم: E=2.58eV .

ملخص:

حركية حاملات الشحنة المرتفعة، قصر الفاصل الطاقوي للجيرمانيوم جدد الاهتمام بالجيرمانيوم لمواصلة التطور التاريخي للمكونات الالكترونية. للحصول على مكونات الكترونية أساسها الجيرمانيوم عالية الأداء، من الضروري فهم انتشار المطعمات في هذا النصف ناقل. حالياً، إنتشار مطعمات النوع السالب في الجيرمانيوم على الغالب ينمذج بانتشارية تناسب تربيعياً مع كثافة الالكترونات الحرة. في هذه المذكرة حددنا كيفية ارتباط عامل التناسب التربيعي لانتشارية الأنتيموان في الجيرمانيوم بدرجة الحرارة، من خلال محاكاة منحنيات الانتشار التجريبية الأنتيموان في الجيرمانيوم في مجال درجة حرارة محصور بين 600-920 درجة مئوية. محاكاة دقيقة تم تحقيقها في هذا المجال من درجة الحرارة أخذين بعين الاعتبار التناسب التربيعي بين انتشارية الأنتيموان وكثافة الالكترونات الحرة.

Résumé :

La mobilité intrinsèque élevée des porteurs, la faible bande interdite pour le germanium ont suscité un regain d'intérêt pour le germanium afin de poursuivre les progrès historiques des copasants électroniques. Pour obtenir des dispositifs électroniques efficaces à base de germanium, il est nécessaire de comprendre la diffusion du dopant dans ce semi-conducteur. Jusqu'à présent, la diffusion des dopants de type n dans le germanium au maximum est modélisée par une diffusivité proportionnelle au carré de la densité d'électrons libres (n). Cette étude détermine la dépendance en température du facteur de proportionnalité quadratique de la diffusivité de Sb avec la densité d'électrons libres, à travers des simulations de profils de diffusion de Sb expérimentaux dans la plage de température de 600 à 920 °C. Une simulation précise est réalisée dans cette plage de température, en tenant compte de la proportionnalité quadratique entre la diffusivité du Sb et la densité d'électrons libres.