

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة قاصدي مرباح - ورقلة

قسم العلوم الفيزياء



مذكرة لنيل شهادة ماستر أكاديمي

تخصص: فيزياء المواد

من إعداد الطالبة: بن حادي حنان

بعنوان :

دراسة العوامل المؤثرة على عمق الوصلة P-N  
أساسها الجيرمانيوم في شروط الانتشار الذاتي  
واللاذاتي

نوقشت بتاريخ: 2022/06/08

لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة :

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

الموسم الجامعي: 2021 / 2022

# الإهداء

أولاً وقبل كل شيء أحمد الله عز وجل على أن وفقني في هذا العمل أما بعد يشرفني أن أهدي هذا العمل:

إلى نفسي التي عانت من أجل الوصول إلى هذه المرحلة.

إلى التي جعل الله الجنة تحت أقدامها، التي غمرتني بفيض حنانها، التي احترقت لكي تنير لي دربي، قرّة عيني وفؤادي أُمّي الغالية مسعودة أطل الله في عمرها، وإلى الذي بذل جهد السنين من أجل أن أعتلي سلام النجاح والذي أحمل اسمه بكل افتخار والذي العزيز بوحنية أطل الله في عمره ، لكما مني خالص الحب والاحترام والإجلال.

إلى مصدر الحنان والبركة والدايا جدتي أم الخير عوفي وجددي سايح رحمهم الله.

إلى من أظهروا لي ماهو أحلى من الحياة إخواتي وأخواتي الأعزاء (فضيلة ،مصطفى ،فريجة ،عبد الباسط ،سايح ،علي ) فقد كانوا ملجئي وملاذي في كل الصعاب إلى من تذوقت معهم أحلى الحياة وأخواتي التي لم تلدهم أُمّي بنات عمي مريم وجميلة .

إلى من فيهم رائحة أبي: أعمامي وعماتي

إلى من فيهم رائحة أُمّي: جدتي حفظها الله و جددي رحمه الله و خالاتي وأخوالي .

إلى كل من دعمني وشجعني في حياتي وأعطاني دفعة نحو الأمام.

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 أصدقائي الذين كانوا عوناً لي .

إلى أطفالي قسم التحضيري بإبتدائية محمد العيد آل الخليفة بالراشدي 2022.

إلى دفعة الفيزياء المواد بورقلة لسنة 2022.

أهدي هذا العمل المتواضع

{بن داداي حنان}

# شكر و عرفان

بسم الله الرحمن الرحيم اللهم صلي وسلم على سيدنا محمد خير البشرية وخاتم الأنبياء والمرسلين وعلى آله وصحبه ومن اتبعه إلى يوم الدين تسليما كثيرا.

الحمد والشكر أولا وآخرا لله فاطر السماوات والأرض الذي أوصلنا إلى هذا المستوى المتقدم من العلم الذي طالما دعواناه فاستجاب دعوانا واستخرناه فأرشدنا إلى الدرب الصحيح والذي وفقنا بفضل العظيم في إتمام هذه المذكرة.

نتقدم وبكل معاني التقدير والاحترام بالشكر للأستاذ الدكتور "سويقات عبد القادر" لتفضله بالإشراف على هذا العمل، الذي كان معي وأعطاني من وقته ورافقني إلى آخر نقطة في إنجاز هذه المذكرة متمنية له دوام الصحة والعافية والتوفيق.

كما أتقدم بجزيل الشكر إلى أعضاء لجنة المناقشة على قبولهم مناقشة مذكرتي "جريوي محمد" و"سوداني محمد البار" والذين أتشرف بملاحظاتهم وتصويباتهم .

الشكر لكل أساتذتي من الابتدائي إلى الجامعة.

شكرا وبكل ما تحمله هذه الكلمة بين طياتها لعائلاتي "بن دادي" من الكبير إلى الصغير.

وأتقدم أيضا بالشكر والعرفان لكل الزملاء، الشكر لكل من ساعدني ولو بمجرد السؤال عن أحوالي في إنجاز هذه المذكرة أنتم في القلب.

# الفهرس

الصفحة	العنوان.....
I	الإهداء.....
II	الشكر والعرفان .....
III	الفهرس.....
VI	قائمة الجداول.....
VII	قائمة الأشكال.....
IX	قائمة الرموز.....
1	المقدمة .....

## الفصل الأول :أنصاف النواقل ومميزاتها

04	تمهيد.....	
04	العوازل ،أنصاف النواقل والنواقل.....	1.1
04	العوازل.....	1.1.1
04	النواقل.....	2.1.1
05	أنصاف النواقل.....	3.1.1
06	أنواع أنصاف النواقل.....	
06	أنصاف النواقل الأصلية (الذاتية).....	1.2.1
08	أنصاف النواقل المطعمة (اللاذتية).....	2.2.1
08	نصف الناقل من النوع n.....	1.2.2.1
10	نصف الناقل من النوع p.....	2.2.2.1
12	طرق التطعيم.....	
12	طريقة الغرس الأيوني.....	1.3.1
13	طريقة الإنتشار.....	2.3.1

15	..... منابع الشوائب المطعمة	4.1
15	..... الوصلة الثنائية P-N	5.1
17	..... مراجع الفصل الأول	

### الفصل الثاني : الجيرمانيوم وخواصه

19	..... تمهيد	
19	..... تواجده في الطبيعة	1.2
20	..... إكتشاف الجيرمانيوم	2.2
21	..... تنقية الجيرمانيوم	3.2
21	..... طريقة Czochralski	1.3.2
22	..... طريقة الصهر النطاقي	2.3.2
23	..... خواص الجيرمانيوم	4.2
23	..... البنية البلورية	1.4.2
24	..... الفاصل الطاقوي	2.4.2
25	..... تركيز حاملات الشحنة الذاتية	3.4.2
27	..... العيوب النقطية	5.2
28	..... تركيز العيوب في حالة التوازن	1.5.2
29	..... آليات الإنتشار المجهري	6.2
29	..... الإنتشار الفجوي	1.6.2
30	..... الإنتشار البيني	2.6.2
31	..... معامل الإنتشار الذاتي	7.2
31	..... الدراسة النظرية لمعامل الإنتشار	1.7.2
35	..... مراجع الفصل الثاني	

### الفصل الثالث : محاكاة ونتائج

38	تمهيد .....	
38	نمذجة الإنتشار .....	1.3
40	محاكاة الإنتشار .....	2.3
41	نتائج و مناقشة .....	3.3
41	تأثير درجة الحرارة على عمق الوصلة P-N .....	1.3.3
42	تأثير الزمن على عمق الوصلة P-N .....	2.3.3
43	تأثير التركيز على السطح على عمق الوصلة P-N .....	3.3.3
44	تأثير نوع المطعمة على عمق الوصلة P-N .....	4.3.3
45	مراجع الفصل الثالث .....	
46	الخاتمة العامة .....	
47	الملخص .....	

# فهرس الجداول

الصفحة	محتوى الجداول	الرقم
10	يبين قيم طاقة التأين مقدرة بـ $ev$ لبعض الشوائب المانحة .	1
11	يبين قيم طاقة التأين مقدرة بـ $ev$ لبعض الشوائب الآخذة .	2
15	منابع الشوائب المطعمة	3
20	أهم الخامات التي تحتوي على الجيرمانيوم	4
27	يلخص بعض خواص الجيرمانيوم	5
41	المقادير المستعملة في المحاكاة	6
42	المقادير المستعملة في المحاكاة	7
43	المقادير المستعملة في المحاكاة	8
44	المقادير المستعملة في المحاكاة	9

# قائمة الأشكال

الصفحة	محتوى الشكل	الرقم
	الفصل الأول	
05	عصابة الطاقة الممنوعة للمواد الناقلة والنصف الناقلة والعازلة.....	1
06	يوضح مخططات الطاقة للمواد المختلفة .....	2
07	يوضح الرابطة التساهمية لذرتي (Si) و (Ge).....	3
09	يوضح التطعيم من النوع السالب وتحرر الإلكترون .....	4
10	يوضح مستويات المانحات المشغول بالإلكترونات وإنتقال هذه الإلكترونات إلى عصابة النقل بعد إثارتها .....	5
11	يوضح التطعيم من النوع الموجب ويخلف ثقب .....	6
11	يوضح مستويات الطاقة للآخذات داخل العصابة الممنوعة .....	7
13	مخطط يبرز آلية الغرس الأيوني .....	8
14	منحنيات الإنتشار الذاتي خلال مرحلة التمزج .....	9
14	منحنيات الإنتشار الذاتي خلال مرحلة التوزيع .....	10
16	رسم تخطيطي للوصلة الثنائية P-N .....	11
	الفصل الثاني	
19	سبائك من الجيرمانيوم .....	12
21	أول ترانزستور 1974م .....	13
22	طريقة Czochralski .....	14
22	طريقة الصهر النطاقي .....	15



23	..... البنية البلورية للجيرمانيوم	16
23	..... يوضح ذرة الجيرمانيوم	17
24	..... تغيرات الفاصل الطاقوي للجيرمانيوم و السيليسيوم بدلالة درجة الحرارة	18
25	..... مخطط عصابات الطاقة للجيرمانيوم	19
26	..... تغيرات كثافة حاملات الشحنة للجيرمانيوم مع درجة الحرارة	20
27	..... يوضح تواجد الفجوة داخل الشبكة البلورية	21
28	..... يوضح تواجد البنية الذاتية داخل الشبكة البلورية	22
29	..... مخطط يبرز آلية الفجوية	23
30	..... يوضح آلية فرانك _ ترنييل	24
30	..... يوضح آلية الإنتشار وفق البنيات الذاتية	25
31	..... يوضح آلية كيك _ آوت	26
32	..... الحاجز الكموني أثناء إنتقال من موضع إلى لآخر	27
	الفصل الثالث	
41	..... يمثل تأثير درجة الحرارة على عمق الوصلة P-N	28
42	..... يمثل تأثير الزمن على عمق الوصلة P-N	29
43	..... يمثل تأثير التركيز على السطح على عمق الوصلة P-N	30
44	..... يمثل تأثير نوع المطعمة على عمق الوصلة P-N	31

# قائمة الرموز

المقدار	الرمز	الوحدة
مستوى النقل	$E_c$	ev
عرض العصابة الممنوعة	$E_g$	ev
مستوى التكافؤ	$E_v$	ev
ثابت بولتزمان	K	ev.K <sup>-1</sup>
تركيز الإلكترونات 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>

# مقدمة عامة

## مقدمة عامة :

تعتبر فيزياء المواد المكثفة بصورة عامة والصلبة بصورة خاصة، من أهم المجالات التي تهتم بدارسة المواد وتحديد طبيعتها ومميزاتها سواء كانت ناقلة، نصف ناقلة أو معدنية [1]. في السنوات الأخيرة، العديد من الأعمال العلمية كان محور اهتمامها البحث عن مواد جديدة تمتلك خصائص محددة قصد مواكبة التطور الحاصل في شتى مجالات الصناعة. في مجال صناعة المكونات الإلكترونية والالكترونية الضوئية، يركز الباحثون حاليا على إدخال مواد وبنى جديدة تساعد على سيرورة التقدم في هذا المجال، وتلبي متطلبات صناعة مكونات تتميز بحجم أصغر ومعالجة للمعلومات أسرع، تكون بديلة للسليسيوم الذي أصبحت التكنولوجيا القائمة عليه تواجه صعوبات متزايدة مع كل جيل جديد من التكنولوجيا بسبب التيارات السطحية الضائعة الناجمة عن التحجيم . حركية حاملات الشحنة المرتفعة وقصر الفاصل الطاقوي لدى الجيرمانيوم، جذدت الاهتمام بهذا النصف الناقل باعتباره مرشحا واعدة لتعويض السليسيوم من أجل مواصلة تطوير هذه المكونات. هذا الاهتمام بالجيرمانيوم حفز على دراسة انتشار المطعمات بنوعيتها السالب و الموجب في هذا النصف الناقل باعتبارها مفتاحا لتحقيق مكونات مطورة وجد فعالة [2] , [3]. في هذا المذكرة نسلط الضوء على دراسة العوامل المؤثرة على عمق الوصلة P-N أساسها الجيرمانيوم في شروط الانتشار الذاتي واللاذاتي . أتمنا ذلك وفق خطة بحث تضمنت مقدمة وثلاثة فصول وخاتمة 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 وتواجده في الطبيعة

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

❖ الفصل الثالث : تضمن نمذجة ومحاكاة للانتشار آخذين بعين الاعتبار شروط الانتشار الذاتي واللاذاتي

ودراسة كل من تأثير الحرارة والزمن والتركيز على السطح على عمق الوصلة، وهذا باعتبار التطعيم السالب يمثل الأرسونيك المنتشر والموجب يمثله الغاليوم المطعم به الجيرمانيوم مسبقا، درسنا بعد ذلك تأثير نوع المطعمة المنتشرة على عمق الوصلة من خلال مقارنة بين انتشار الأرسونيك والفسفور والأنثيموان في الجيرمانيوم .

❖ الخاتمة لخصنا فيها أهم النتائج التي تحصلنا عليها.

## مراجع المقدمة :

- [1] A. Benamer, Etude des propriétés physiques de quelques composés intermétalliques binaires : APt3 (A=Mg, Sc, Y et Zr). Effet du bore et de la pression hydrostatique, thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas–Setif 1. Setif, 2018.
- [2] H. Iwai, “Roadmap for 22 nm and beyond”, Microelectronic Engineering **86**, 1520 (2009).
- [3] 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:

يمكن تصنيف المواد الموجودة في الطبيعة اعتمادا على الخواص الالكتروفيزيائية في ثلاثة طوائف كبير ة المعادن ، أشباه الموصلات ،العوازل ، وتعتمد هذه المواد في الأساس على القيمة التي تملكها المقاومة النوعية الكهربائية للمادة . نسلط الضوء في هذا الفصل على هذه المواد أنواعها وطرق تطعيمها .

## 1.1- العوازل، أنصاف النواقل والنواقل :

### 1.1.1- العوازل:

وهي مواد تتميز بامتلاكها فجوة طاقة عريضة وتصل قيمتها حوالي ( 3-8 ) إلكترون فولط ( eV )، وتكون حزمة التكافؤ فيها مملوءة بالإلكترونات بينما حزمة التوصيل فارغة ، وحتى عند رفع درجة حرارتها تبقى هذه الخاصية في العوازل ، وذلك لأن الطاقة الحرارية  $KT$  غير كافية لنقل الالكترون من عصابة التكافؤ الى عصابة النقل وجعله حرا ، وناقليتها ضعيفة جدا تتراوح فيما بينها في مجال  $(10^{-8} \text{ cm}^{-1} \Omega^{-1} - 10^{-18} \text{ cm}^{-1} \Omega^{-1})$  مقاومتها النوعية لممر التيار الكهربائي عالية جدا تتراوح فيما بينها في مجال  $(10^{14} \text{ cm} \cdot \Omega - 10^{22} \text{ cm} \cdot \Omega)$  ، ولا تسمح بممر التيار الكهربائي لعدم وجود وفرة من الالكترونات الحرة ، مثل الزجاج ، البلاستيك ، المطاط ، الخشب ، الكوارتز..... [1,2,4]

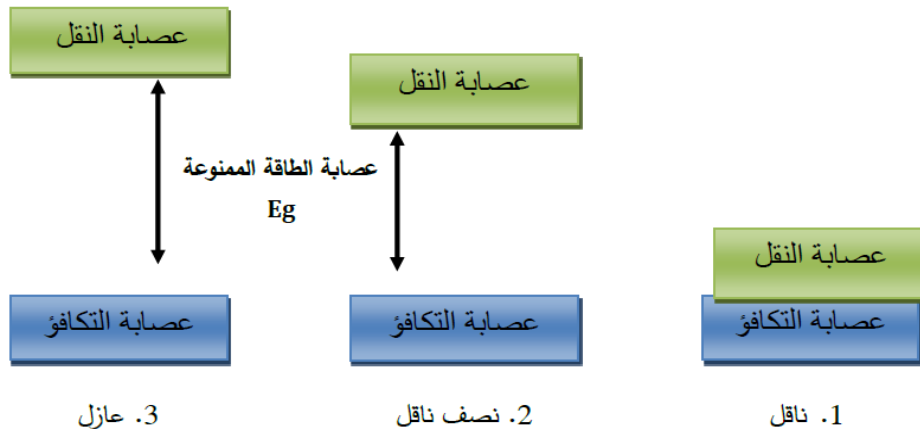
### 2.1.1- النواقل (المواد الموصلة) :

هي مواد تتميز بمداخلة حزمة التكافؤ مع حزمة التوصيل ، أي اختفاء فجوة الطاقة ، حيث ناقل يها الكهربائية عالية جدا  $(10^4 \text{ cm}^{-1} \Omega^{-1} - 10^6 \text{ cm}^{-1} \Omega^{-1})$  ، ومقاومتها النوعية للتيار صغيرة جدا  $(10^{-6} \text{ cm} \cdot \Omega)$  ، وتسمح بممر التيار الكهربائي من خلالها لاحتوائها وفرة من الالكترونات الحرة ، والكترونات التكافؤ تكون هي نفسها الالكترونات التوصيل ، وعند تواجد مجال كهربائي ما تكتسب الالكترونات طاقة إضافية مما يؤدي إلى سهولة الانتقال بين مستويات الطاقة المختلفة مثل الحديد، النحاس ، الألمنيوم..... [1,2,4] .

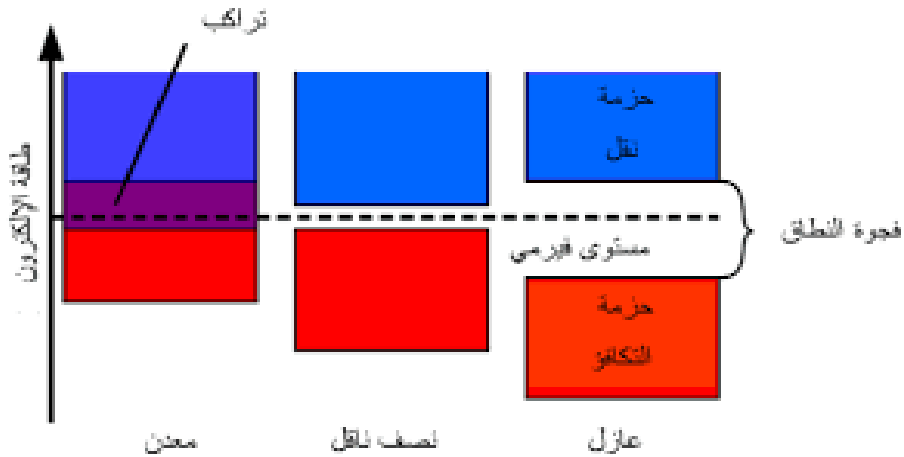


### 3.1.1- أنصاف النواقل (المواد شبه الموصلة) :

هي عبارة عن موصلات إلكترونية ذات مقاومة نوعية كهربائية أكبر من مقاومة الموصلات ولكنها أقل من مقاومة المواد العازلة ، ولها ناقلية تقع بين هاتين المجموعتين أي بحدود (  $10^{-8} \text{ cm}^{-1} \Omega^{-1}$  -  $10^{-1} \text{ cm}^{-1} \Omega^{-1}$  ) ، ولها قدرة على توصيل التيار الكهربائي، ولكن ليست بجودة توصيل الموصلات. حيث سعة فجوة الطاقة تقدر واحد إلكترون فولط (  $1 \text{ eV}$  ) ، وتتميز هذه المواد بكونها عازلة عند درجة حرارة الصفر المطلق ، حيث تكون حزمة التوصيل فارغة أي لا توجد طاقة كافية عند أي إلكترون لكي ينتقل إلى حزمة التوصيل ، وبالتالي تكون عازلة مثاليا أما عند زيادة درجة الحرارة تكون موصلة حيث يكتسب عدد من الإلكترونات الطاقة الكافية لكي ينتقل إلى حزمة التوصيل مثل السليكون (Si) والجرمانيوم (Ge) [1, 3, 5] .



الشكل (1): عصابة الطاقة الممنوعة للمواد الناقلة والنصف ناقلة والعازلة .



الشكل (2) : يوضح مخططات الطاقة للمواد المختلفة.

في الناقل يتداخل شريط التكافؤ وشريط التوصيل، في نصف الناقل فجوة الطاقة تكون صغيرة، أما في العازل تكون كبيرة ولا تستطيع الإلكترونات التوصيل اجتيازها .

## 2.1- أنواع أنصاف النواقل :

تصنف أشباه الموصلات إلى مجموعتين وهي أشباه موصلات النقية وأشباه الموصلات الغير النقية .

### 1.2.1- أنصاف النواقل الأصلية (الذاتية) :

تدعي المواد النصف ناقلة النقية الخالية من الشوائب بأنصاف النواقل الذاتية، وهي عناصر المجموعة الرابعة (IV) من الجدول الدوري، ومن أهمها السيليكون و الجيرمانيوم حيث تكون فيها حزمة التكافؤ مملوءة بالالكترونات بينما تكون حزمة النقل فارغة كليا منها عند درجة حرارة الصفر المطلق (  $0K$  ). ولهذا تعد المواد النصف ناقلة عازلة عند هذه الدرجة ، وعند رفع درجة حرارة المواد النصف ناقلة الذاتية فإن بعض إلكترونات حزمة التكافؤ يمكن أن تتأثر حراريا فتكتسب طاقة تنتقل بها إلى حزمة النقل تاركة خلفها عدد من الفجوات مساوية إلى عدد الالكترونات المغادرة ، حيث يقع مستوي فيرمي لهذا النوع من أنصاف النواقل في منتصف فجوة الطاقة الممنوعة عند درجة حرارة الصفر المطلق كما هو موضح في المعادلة التالية : [2,13,14,15,16].

$$E_f = \frac{E_c + E_v}{2} \quad (1.1)$$

$E_f$  : طاقة مستوي فيرمي .

$E_c$  : طاقة حزمة الطاقة .

$E_v$  : طاقة حزمة التكافؤ

مستوي فيرمي هو أعلى مستوى طاقة يشغلها الإلكترون في درجة حرارة الصفر المطلق، أي عدم وجود إلكترون

فوق مستوى فيرمي، لكن ارتفاع درجة الحرارة تساعد الإلكترونات على تجاوز مستوى فيرمي [15].

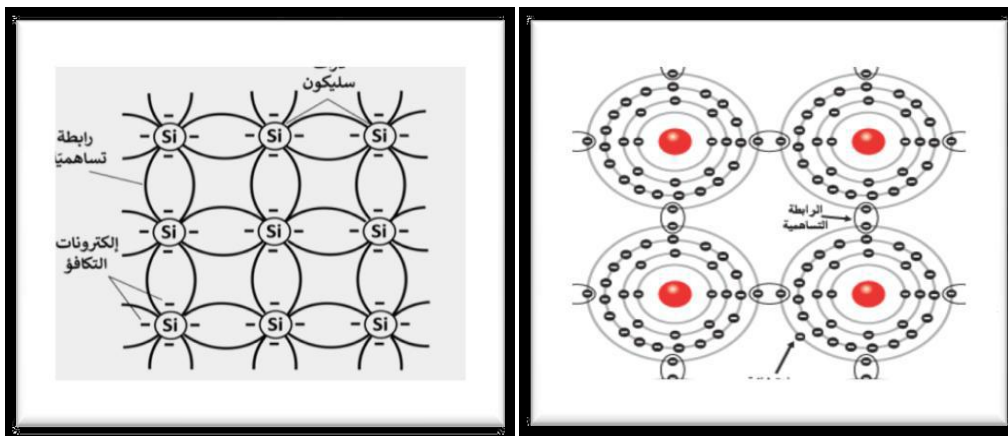
تمتلك عناصر المجموعة الرابعة من الجدول الدوري، أربعة إلكترونات تكافؤية وتدعى البلورات التي من ضمنها مواد

البلورات التساهمية وتنشأ قوى التماسك في البلورات التساهمية من وجود إلكترونات مشتركة بين الذرات المتجاورة

فكل ذرة مشتركة بأصرة تساهمية مع جارها تساهم بإلكترون واحد في الأصرة ويكون إلكترونان مشتركين بين

الذرتين وهذا ما يحدث في ذرتي السليكون والجرمانيوم كما هو مبين في الشكل (6)، وتكون بذرات السليكون

والجرمانيوم مرتبة بشكل هندسي منتظم وذات تركيب بلوري [1,3].



الشكل (3) : يوضح الرابطة التساهمية لذرتي (Si) و (Ge).

### 2.2.1- أنصاف النواقل المطعمة (اللاذاتية) :

بالإضافة إلى حاملات الشحنة التي تنشأ حرارياً في النصف الناقل يمكن خلق حاملات الشحنة ( الالكترونات والثقوب ) ، وذلك بإضافة شوائب إلى المادة النصف الناقلة النقية وبنسب قليلة ومحدودة ومناسبة، هذه العملية تكسب الناقل النصف النقي خواص فيزيائية تختلف عما هي عليه في حالته النقية مثل تطعيم السيلسيوم النقي بالبور . ينتج عن عملية التطعيم إزاحة التوازن الموجود بين تركيزي حاملات الشحنة الموجبة والسالبة بعد أن كان تركيزهما مساوي في الحالة النقية ، تجعل هذه الإزاحة تركيز الالكترونات في عصابة النقل  $B_c$  أكبر من تركيز الثقوب في عصابة التكافؤ  $B_v$  أو تركيز الالكترونات في عصابة النقل  $B_c$  أقل من تركيز الثقوب في عصابة التكافؤ  $B_v$  وذلك حسب نوع التطعيم [2,11] .

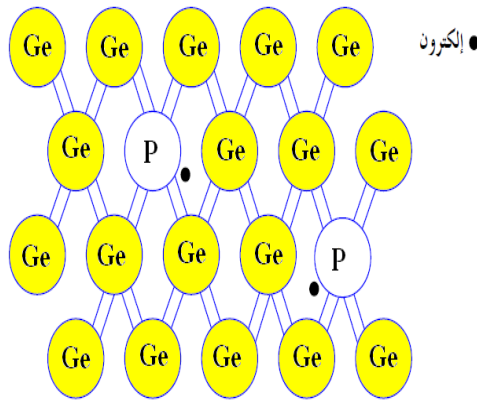
وتعتبر هذه التقنية -التطعيم- الأكثر إنتشاراً لتغيير الناقلية النوعية لأنصاف النواقل . وهكذا ، فنصف الناقل اللاذاتي أو المولد هو نصف ناقل مطعم بشائبة معينة قادرة على تعديل عميق في خصائصه الكهربائية ، مما يجعله مناسباً للتطبيقات الإلكترونية ( الديودات والترانزيستورات ، وما إلى ذلك ) أو التطبيقات الإلكترونية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

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

### 1.2.2.1- نصف الناقل من النوع $n$ :

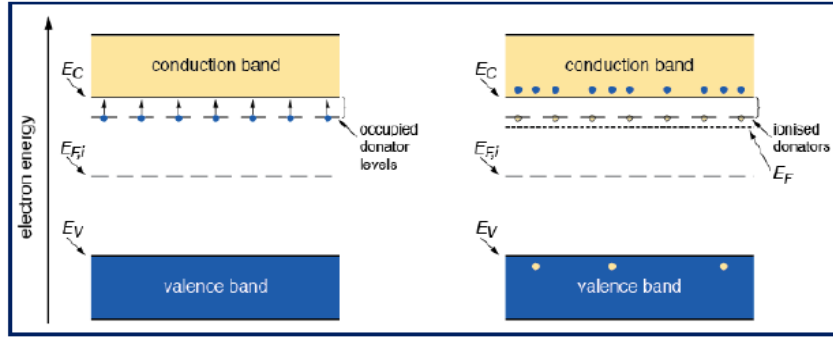
يكون التطعيم في هذه الحالة بذرات من عناصر العمود الخامس من الجدول الدوري و التي تسمى بالممانحة حيث هذا التطعيم ينتج عنه زيادة في كثافة الالكترونات الحرة في نصف الناقل بحيث تصبح تمثل حاملات الشحنة الأغلبية بينما الثقوب تمثل حاملات الشحنة الأقلية.

وفي الجيرمانيوم تكون كل ذرة من ذراته في الحالة الصلبة مرتبطة مع البلور ضمن روابط تكافئية عددها أربع. تحتاج الإلكترونات التكافؤ إلى طاقة تعادل الفاصل الطاقوي في الظروف الاعتيادية لكي تنتقل إلى مستوى النقل وتساهم في التوصيل. إن درجة حرارة المحيط لا تكفي لتوفير هذه الطاقة. عند إضافة شائبة خماسية التكافؤ (المانحة) مثل الفسفور والأرسنيك والانتيموان إلى الشبكة البلورية للجيرمانيوم ، تكون روابط تساهمية مع الذرات الأربع المحيطة بكل منها ويبقى إلكترون واحد معلق بالذرة الأم، حيث تساهم الذرة المانحة بأربع إلكترونات والجيرمانيوم بأربع إلكترونات، ويصبح الغلاف مشبعا ويحتوي على ثمانية إلكترونات ويظل الإلكترون الخامس غير مرتبط و يمكن إثارته لينتقل إلى مستوى النقل ويساهم في نقل التيار الكهربائي [12,11,10] .



الشكل (4) : يوضح التطعيم من النوع السالب وتحرر الإلكترون.

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



الشكل (5) : يوضح مستوى المانحات المشغول بالكترونات وانتقال هذه الالكترونات إلى عصابة النقل بعد إثارتها.

الجدول(1) : يبين قيم طاقة التأين مقدرة بالإلكترون فولط لبعض المطعومات المانحة.

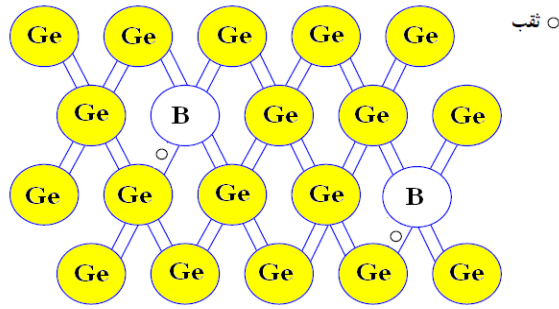
العنصر	P	As	Sb
طاقة التأين الجيرمانيوم	0.012	0.0127	0.096

تتواجد الالكترونات الناتجة عن المطعومات المانحة في BC بدون ثقب مقابل لها في BV، لذلك يتحدد النقل أساسا في نصف الناقل بالالكترونات [11].

يدعى نصف الناقل المطعم بعناصر العمود الخامس بنصف الناقل من النوع n .

### 2.2.2.1-نصف الناقل من نوع p :

بنفس الآلية نقوم بعملية تطعيم للجيرمانيوم النقي ولكن بشوائب ثلاثية التكافؤ من عناصر العمود الثالث والتي تسمى بالشوائب الآخذة مثل البور B والألمنيوم Al والغاليوم Ga والاندسيوم In، حيث عند اشابة الجيرمانيوم بإحدى هذه الشوائب فإن إلكترونات التكافؤ الثلاثة فيها تساهم بالرابطة التكافئية فتبقى رابطة واحدة غير مكتملة عندها تثار الالكترونات في عصابة التكافؤ لتماماً رابطة مخلفة وراءها ثقب في عصابة التكافؤ .



الشكل (6) : يوضح التطعيم من النوع الموجب ويخلف ثقب .

إن عملية التطعيم بالشوائب الآخذة يمكن أن تخلق نصف ناقل كثافة الثقوب في عصابة التكافؤ فيه أكبر بكثير

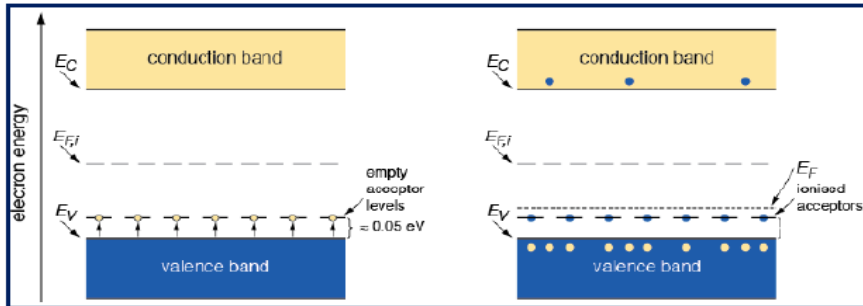
من كثافة الإلكترونات في عصابة النقل، هذا يعني أن الثقوب فيه تمثل حاملات الشحنة الأكثرية بينما

الإلكترونات تشكل الحاملات الأقلية، وعلية يسمى النصف الناقل المطعم بهذه الطريقة نصف ناقل من النوع P

في هذه الحالة يكون مستوى طاقة الشائبة الموجود في الفاصل الطاقوي قريب جدا من قمة عصابة التكافؤ ،

حيث تنتقل له الإلكترونات عند إثارتها بطاقة تعادل طاقة التأين من عصابة التكافؤ مخلفة ثقوبا في هذه العصابة

كما يوضحه الشكل (6) [11,10,6,1,2] .



الشكل(7) : يوضح مستويات الطاقة للآخذات داخل العصابة الممنوعة .

الجدول (2) : يبين قيم طاقة التأين مقدرة بالإلكترون فولط لبعض الشوائب الآخذة .

العنصر	B	Ga	In
طاقة التأين في الجيرمانيوم	0.0104	0.0108	0.0112

### 3.1- طرق التطعيم :

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

#### 1.3.1- الغرس الأيوني :

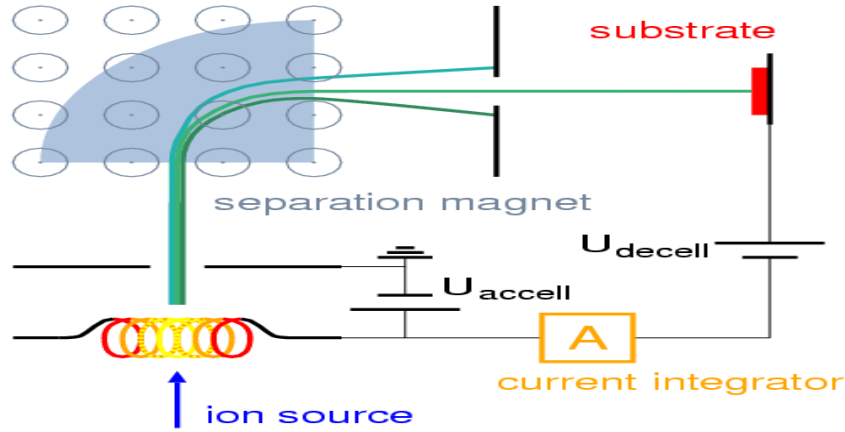
هي تقنية مستخدمة في علم المواد من أجل تغيير الخصائص الفيزيائية للأجسام الصلبة. تستخدم هذه العملية في تصنيع أنصاف النواقل وفي العديد من التطبيقات الأخرى للمواد. طور مبدأ غرس الأيونات كوسيلة من أجل إنتاج وصلات من النوع الموجب والسالب للمكونات الالكترونية والالكترونية الضوئية في أواخر سبعينات وأوائل ثمانينات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

تعتمد هذه الطريقة على إدخال 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 البنيوي 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) السرعات ذات طاقة مرتفعة، ومن الحجر 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 [10,11] .





الشكل (8) : مخطط يبرز آلية الغرس الأيوني .

### 2.3.1- الإنتشار :

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

$$n = n_i$$

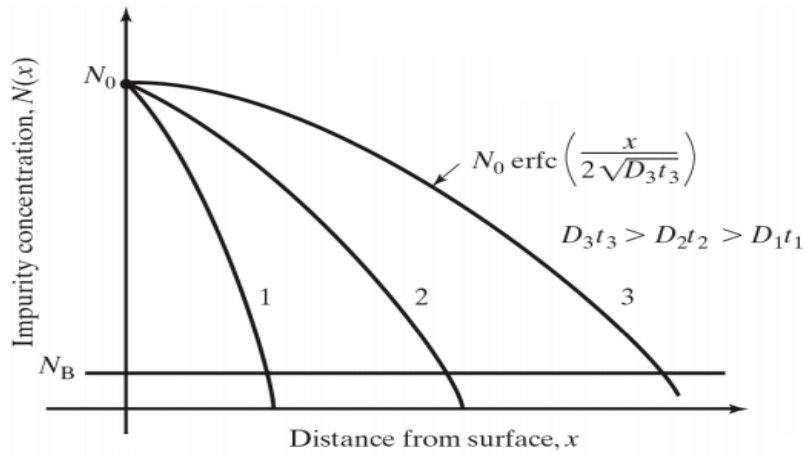
مجال الإنتشار اللاذاتي : في هذا المجال يكون تركيز الشوائب معتبر مقارنة بتركيز الحاملات الذاتية وهذا يحصل عندما تكون العينة مشابه بقدر كبير [11].

في التطبيق العملي يتم التطعيم وفق هذه الطريقة على مرحلتين :

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

وتحت درجة حرارة ثابتة. يحدث الانتشار في هذه الحالة على أعماق صغيرة مقارنة بسمك صفائح المادة النصف

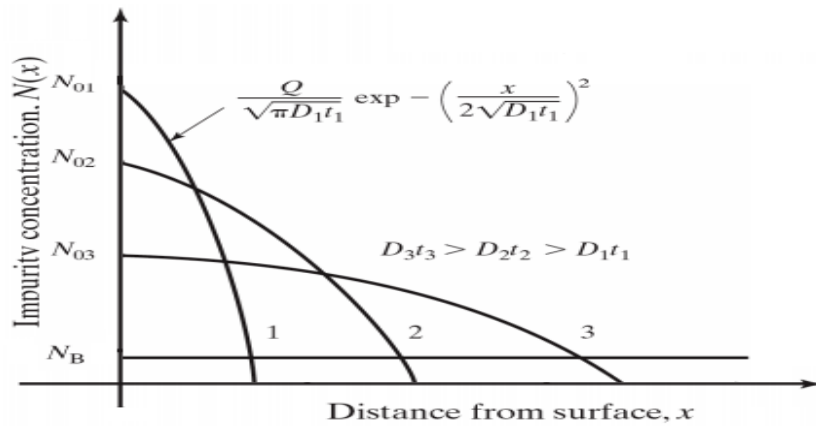
ناقلة. الشكل (9) يبين منحنيات الانتشار في الشروط الذاتية في حالة التموضع المسبق [11] .



الشكل (9) : منحنيات الانتشار الذاتي خلال مرحلة التوضع .

مرحلة التوزيع : يقطع منبع الإشابة عن صفائح الجيرمانيوم ويتم إخضاعها إلى درجات حرارة عالية لكي تصل الشوائب المطعمة إلى عمق أكبر. تكون منحنيات الانتشار في الشروط الذاتية في حالة التوزيع كما هو مبين في

الشكل (10) .



الشكل (10) : منحنيات الانتشار الذاتي خلال مرحلة التوزيع .

#### 4.1- منابع الشوائب المطعمة :

تتنوع منابع الشوائب المطعمة منها ماهو غازي ومنها ماهو سائل ومنها ماهو صلب . الجدول (3) الموالي يبين بعضها [11] .

الجدول (3): منابع المطعمات .

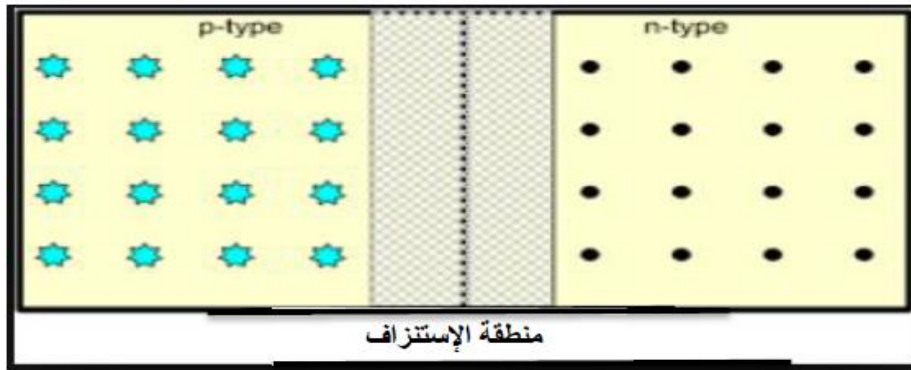
الحالة	إسم المركب	الصيغة	العنصر	النوع
صلب	ثالث أوكسيد الانتيموان	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	الانتيموان	N
صلب	ثالث أوكسيد الارسونيك	As <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	الارسونيك	
غاز	الارسين	AsH <sub>3</sub>		
سائل	أوكسيد كلوريد الفوسفور	POCL <sub>3</sub>		
صلب	خامس أوكسيد الفوسفور	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	الفوسفور	
غاز	الفوسفين	PH <sub>3</sub>		P
سائل	ثالث بروميد البور	BBr <sub>3</sub>		
صلب	ثالث أوكسيد البور	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		
صلب	الديوران	B <sub>2</sub> H <sub>6</sub>		
غاز	ثالث أوكسيد الكلور	BCL <sub>3</sub>	البور	
	نيتريد البور	BN		

#### 5.1- الوصلة الشائبة P-N :

الوصلة PN هي عبارة عن مركب إلكتروني يصنع من المواد الشبيهة الناقلة ، تتكون من طبقتين رقيقتين "بلورتين" تصنع من مادة موصلة ، حيث تتكون الوصلة من جزئين ، الجزء الأول عبارة عن شبه ناقل مطعم بالذرات المانحة أي أن بها إلكترونات حرة بمعنى آخر من نوع n ، أما الجزء الثاني فهو شبه ناقل مطعم بذرات آخذة أي من نوع p كما تحتوي الوصلة على حاجز (Barrier) يكون موجود بين سطحي الالتصاق للبلورة من نوع n مع

البلورة من نوع p ، للعلم أن حاملات الشحنة في الجزء n هي الإلكترونات وحاملات الشحنة في الجزء p هي الثقوب [17].

ما إن يتم إلتصاق البلورتين أثناء عملية التصنيع حتى تنتقل الإلكترونات القريبة من سطح الإلتصاق من البلورة n خلال الحاجز لتملأ الفجوات الإلكترونية القريبة من نوع p .



الشكل (11): رسم تخطيطي للوصلة الشائبة P-N.

## مراجع الفصل الأول

- [1] - محمد أسعد البعيع ؛ الفيرا الكسندر وفنا الدويري ؛ صفاء توفيق المقبل ، الإلكترونيات ، الطبعة الأولى 2014 م - 1435 هـ ، مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع .
- [2] - الدكتور محمد قعقع ، الإلكترونيات الأساسية (الإلكترونيات 1) ، جامعة دمشق كلية العلوم .
- [3] - الدكتور مناف عبد حسن ، فيزياء الحالة الصلبة ، الطبعة الأولى 2004 م - 1424 هـ ، دار صفاء للنشر والتوزيع - عمان .
- [4] - م.مؤيد فايز القواسمة ، أشباه الموصلات ، الطبعة الأولى 2006 م - 1426 م ، مكتبة المجتمع العربي للنشر والتوزيع .
- [5] - بوراس ذكرى ، مذكرة مقدمة لنيل شهادة الماستر في الفيزياء تخصص علوم المادة بعنوان الحركية في الآبار الكوانتية لأنصاف النواقل ، جامعة العربي بن مهدي أم البواقي ، 2012/2013 م .
- [6] - د.فخري اسماعيل حسن ، الكهرباء وأشباه الموصلات ، جامعة قسنطينة ، الطبعة الثانية 1989 م ، ديوان المطبوعات الجامعية الجزائر .
- [7] - د. وليد القادري ، موسوعة الفيزياء "الكلاسيكية والحديثة" ، الطبعة الثالثة 2009 م ، دار أسامة للنشر والتوزيع الأردن - عمان .
- [8] - مصطفى عباس هادي ؛ محمد حميد مهدي ، دراسة الخصائص الأساسية والبصرية والعيوب البلورية لأشباه الموصلات ، بحث مقدم إلى رئاسة قسم الفيزياء - كلية التربية كجزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في الفيزياء ، جامعة القادسية / كلية التربية ، جمهورية العراق ، 2017 م .

- [9]- وردة بن علي ؛ صبرين بوشول ، مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة ماستر أكاديمي بعنوان تحضير ودراسة الأغشية الرقيقة لكبريتيد الكاديوم (Cds) المرسبة بطريقة الحمام الكيميائي (CBD) ، جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي -كلية العلوم الدقيقة - قسم الفيزياء ، 2018/2017 م .
- [10]- هامل عبد الوهاب ، مذكرة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه دولة بعنوان تطوير نموذج السطح المسنن للخلايا الشمسية للحصول على مردود طاقي عالي ، جامعة باجي مختار - عنابة ، 2010 / 2009 م .
- [11]- سويقات عبد القادر - أطروحة مقدمة لنيل شهادة الدكتوراه بعنوان دراسة لنصف الناقل الجيرمانيوم المطعم للاستعمال في المكونات الإلكترونية الضوئية ، جامعة قاصدي مرباح - ورقلة، 2016 / 2015 م .
- [12] د.عبد القادر مصباح الأمين ، " تحليل الدوائر الكهربائية و الالكترونية " ، ليبيا ، 2004.
- [13] م . م . شاكر و م . ش . مجيد، " أساسيات الإلكترونيات " ، المعهد الفني، الموصل، (1978) .
- [14] M. A. Omer, "Elementary of solid state physics", Addison Wesley publishing company, Boston,(1975).
- [15] A. N. Doral, "Semiconductor Physics and devices", Irwin, USA,(1992).
- [16] مؤيد جبريل يوسف، " فيزياء المادة الصلبة" ، مطبعة جامعة بغداد، ج2، (1989) .
- [17] البهلول يعقوبي، " الكتاب حول العناصر الإلكترونية ثنائي شبه موصل. (book of Semiconductor Diode) ، سنة 1987 .



الفصل الثاني:

الجير مانيوم وخواصه

تمهيد :

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

### 1.1 -تواجد الجيرمانيوم في الطبيعة :

الجيرمانيوم هو من أشباه الموصلات التي لها خواص كهربائية بين تلك المعادن والعوازل و عنصر شبه معدني له لون بني مبيض الشكل (12). يقع في العمود الرابع من الجدول الدوري لمندليف، أسفل السيليسيوم مباشرة . يرمز له ب (Ge) وعدده الذري  $Z=32$  و هو مزيج ل 5 نظائرمستقرة وهي على الترتيب  $^{74}\text{Ge}$  (35.94%)،  $^{72}\text{Ge}$  (27.66%)،  $^{70}\text{Ge}$  (21.23%)،  $^{73}\text{Ge}$  (7.73%)،  $^{76}\text{Ge}$  (7.44%) . إضافة إلى ذلك هناك 33 نظير مشع لهم فترة نصف عمر تتراوح بين الملي من الثانية الى عدة أيام. الجيرمانيوم لايتواجد نقيا في الطبيعة، وإنما يتواجد ممزوجا بعناصر أخرى بشكل خامات كما في الجدول (3)، أغلبها متواجدة بأكرانيا وروسيا وأيضا الصين. تستغل هذه الخامات بغية الحصول منها على الجيرمانيوم [7,6,1] .



الشكل (12) : سبائك من الجيرمانيوم [3].

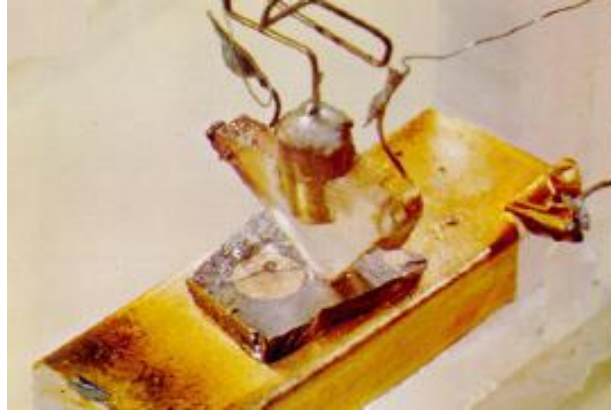


الجدول (4) : أهم الخامات التي تحتوي على الجيرمانيوم [1,4].

الخامات	نسبة إحتوائها من الجيرمانيوم %
الاربروايدت $4Ag_2S - GeS_2$	6.7
الجيرمانيت $7CuS - FeS - GeS_2$	8.7
الكانفيلديت $Ag_8SnS_6$	1.8
الرينياريت مركب $Ge, Fe, AS, Cu$	7.8

## 2.1- إكتشاف الجيرمانيوم :

في سنة 1864 تصور العالم John Newlands وجود عنصر وسيط بين السيليسيوم والقصدير أثناء إنشاء الجدول الدوري الأول للعناصر الكيميائية، وفي سنة 1871، فكر العالم Dmitri Mendeleev في وجود هذا العنصر حيث حدد موقعه وسماه شبيه السيليسيوم إلا أن أتى العالم Clemens Winkler الذي استطاع استخلاص العنصر من خام argyrodite وأعطى له اسم الجيرمانيوم في إشارة إلى 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 [1-5].



الشكل (13) : أول ترانزستور في 1974 [2].

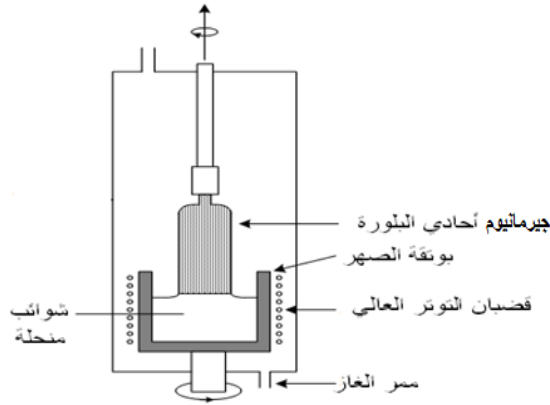
### 3.1- تنقية الجيرمانيوم :

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

### 1.3.2- طريقة (Czochralski) :

إخترع Czochralski هذه الطريقة البسيطة لنمو البلورة خلال تجربة قياس سرعة تبلور المعادن ، وفي سنة 1916 أثبتت أنها مفيدة جدا لتبلور العديد من السبائك .

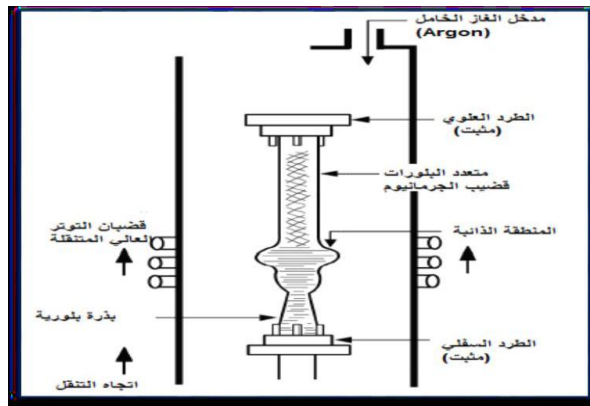
في هذه الطريقة يتم صهر الجيرمانيوم في بوتقة داخل فرن . ثم يتم بعد ذلك سحب الجيرمانيوم أحادي البلورة انطلاقا من الوسط ببطء، و سحب البلورات الأحادية يتم بالتزامن مع إبقاء البلورة في حالة دوران لتحقيق تجانس الحمام ومراقبة شكل السطح البيني صلب سائل [3,10,11,12,13].



الشكل (14): طريقة Czochralski [5].

### 2.3.2- طريقة الصهر النطاقي:

تقنية Fz مناسبة لإنتاج رقائق صغيرة مع شوائب منخفضة من الأكسجين ، 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 [5,3].

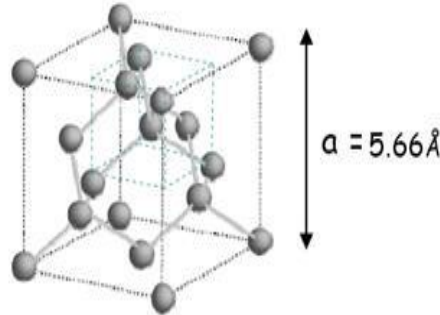


الشكل (15): طريقة الصهر النطاقي [5].

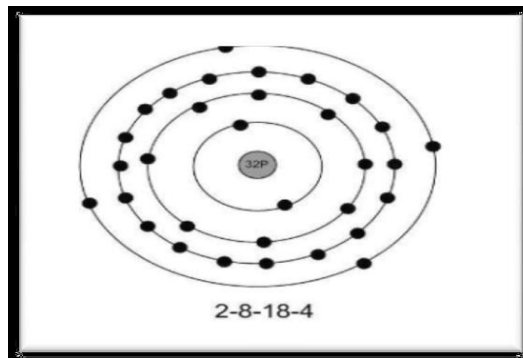
#### 4.1- خواص الجيرمانيوم :

##### 1.4.1- البنية البلورية :

تنظم ذرات الجيرمانيوم في شبكة بلورية من نوع الألماس كما هو مبين في الشكل رقم (16) . 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 ب  $(\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4})$  على طول القطر الرئيسي . وإذا فحصنا ذرة الجيرمانيوم منفردة سنجد أنها تحتوي على نواة بها 32 بروتون، عندما تكون هذه الذرة في الحالة العادية فإنه سيكون بها 32 إلكترون تدور حول النواة . إن هذه الإلكترونات الدوارة حول النواة تتوزع بنمط ثابت:  $2, 8, 18, \dots, 2n^2$  وتماثل الأغلفة Shells المحيطة بالنواة . حيث تمثل n عدد الأغلفة [9].



الشكل (16) : البنية البلورية للجيرمانيوم [8].

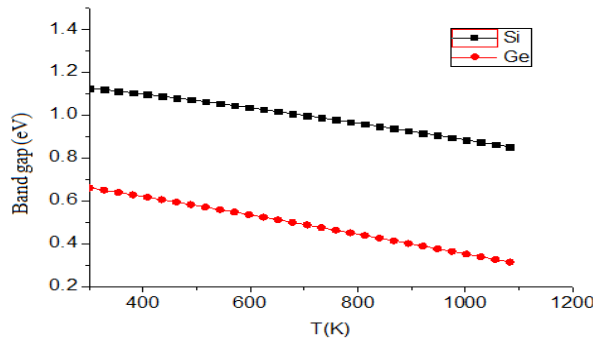


الشكل (17) : يوضح ذرة الجيرمانيوم [9].

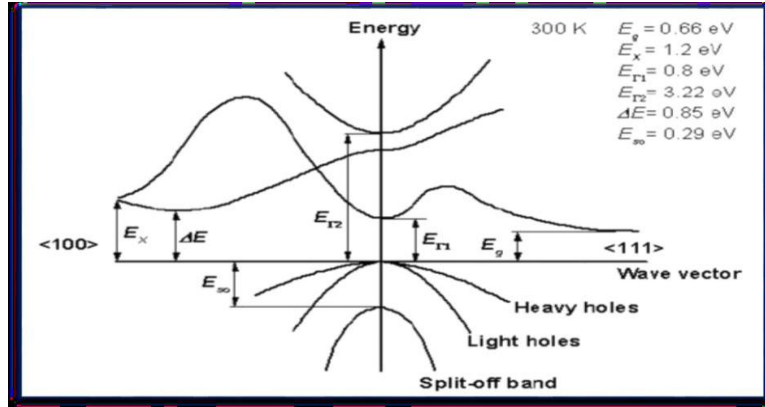
### 2.4.1-الفاصل الطاقوي :

يتحدد الفاصل الطاقوي من خلال المنحنيات البيانية الممثلة لتغيرات الطاقة E للالكترونات بدلالة شعاع الموجة K. تعتبر هذه المنحنيات المحدد الأساسي للخواص الفيزيائية للمواد فدرجة امتلاء أعلى عصابة طاقيا والمسماة بعصابة النقل (BC) واحتمالية تطابقها مع العصابة الأدنى منها طاقيا والمسماة بعصابة التكافؤ (BV) تحدد كون المادة ناقلة ، نصف ناقلة ،عازلة . في المواد العازلة وعند درجة OK تكون عصابة النقل فارغة تماما من الالكترونات عكس عصابة التكافؤ التي تكون ممتلئة. يقدر الفاصل الطاقوي في الجيرمانيوم في درجة حرارة الغرفة (300K) ب 0.66 ev الذي يجعله قارئ جيد للإشارات التي أطوال موجاتها محصورة بين 1.55-1.3 ميكرومتر ويؤمن بذلك الوساطة بين المكونات الإلكترونية الضوئية والميكروإلكترونية العاملة في هذا المجال من الاتصالات. يتغير الفاصل الطاقوي للجيرمانيوم وفق العلاقة التالية [3]:

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



الشكل (18) : تغيرات الفاصل الطاقوي للجيرمانيوم والسيليسيوم بدلالة درجة الحرارة .



الشكل (19): مخطط عصابات الطاقة للجيرمانيوم [3].

### 3.4.1- تركيز حاملات الشحنة الذاتية :

معرفة كثافة حاملات الشحنة في نصف الناقل يعد ضروريا لمعرفة خواصه الكهربائية. تصاحب عملية الإثارة الحرارية للإلكترونات من عصابة التكافؤ BV الى عصابة النقل BC عملية معاكسة تسمى الاتحاد. تنتقل الإلكترونات من عصابة النقل BC الى عصابة التكافؤ BV لتتحد مع الثقوب الحرة، مما يخفض من الناقلية. تتناسب احتمالية الاتحاد مع عدد الإلكترونات الحرة في عصابة النقل BC ومع عدد الثقوب الحرة في عصابة التكافؤ 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. في حالة التوازن الحراري تحدد الكثافة الكلية للإلكترونات في عصابة النقل والثقوب في عصابة التكافؤ وفق العبارات التالية [3,14,16] :

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

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

أين  $E_c$ ،  $E_f$ ،  $E_v$  تمثل على الترتيب مستوى التكافؤ ومستوى فيرمي ومستوى النقل .

الكتلة الفعالة للإلكترونات والثقوب  $m_e, m_h$ .

ومن قانون فعل الكتلة نجد :

$$n.p = n_i^2$$

في المجال الذاتي يكون

$$n = p = n_i$$

وتكون عبارة تركيز حاملات الشحنة الذاتية كالتالي :

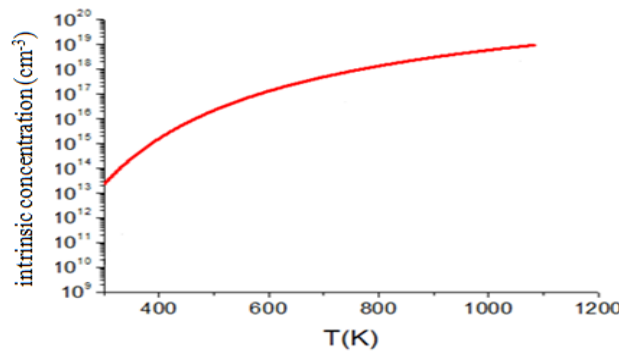
$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left[-\frac{E_g}{2KT}\right]$$

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

الثقوب في عصابة التكافؤ.  $n_i$  كثافة حاملات الشحنة الذاتية في النصف ناقل النقي، حيث يوضح الشكل أدناه

تغيرات كثافة حاملات الشحنة الذاتية عند مختلف درجات الحرارة للجيرمانيوم وفقا للعلاقة الآتية :

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



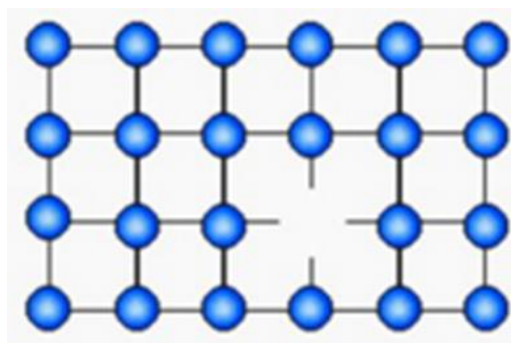
الشكل (20): تغيرات كثافة حاملات الشحنة للجيرمانيوم مع درجة الحرارة.

الجدول (5): يلخص بعض خواص الجيرمانيوم [3].

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

### 5.1- العيوب النقطية في الجيرمانيوم :

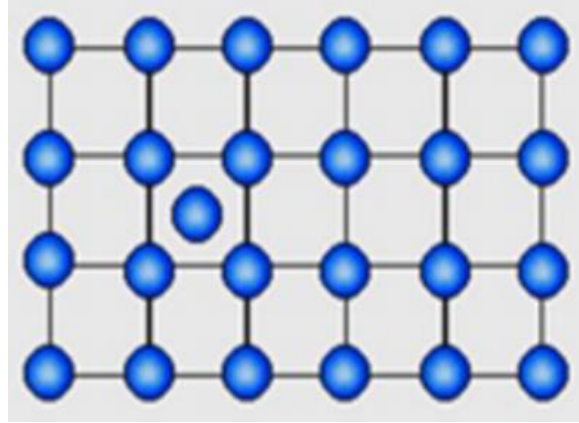
في الحقيقة لا وجود لبلورة مثالية في الطبيعة فكل بلورة لها عيوب وان كانت قليلة ،والعيوب البلوري بالنسبة للمواد الصلبة هو اختلال في استمرارية تركيب الذرات وذلك لعدة عوامل منها الحرارة.وأبسطها العيوب النقطية .و يعتبر وجود العيوب النقطية أمرا لا بد منه أثناء تبلور المادة .حيث نميز نوعين أساسيين من العيوب يلعبان الدور الرئيسي في انتقال الشوائب داخل المنظومة البلورية للجيرمانيوم. الأول هو الفجوة والتي يرمز لها بالرمز  $V$  تظهر نتيجة غياب ذرة جيرمانيوم عن موضعها في الشبكة البلورية المثالية [3,17].



الشكل (21) : يوضح تواجد الفجوة داخل الشبكة البلورية .



العيب الثاني يتمثل في البنية الذاتية وهي عبارة عن ذرة جيرمانيوم منحرفة عن موضعها ومنغرس في موضع بيني من الشبكة البلورية للجيرمانيوم.



الشكل (22) : يوضح تواجد البنية الذاتية داخل الشبكة البلورية .

### 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 المحققة للتوازن الديناميكي تكون أصغر.

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

حيث  $c_x$ ،  $\Delta G_x^f$  هما على ترتيب كثافة المواقع في الشبكة البلورية والطاقة الحرة لتشكيل العيب النقطي .

إن العيوب النقطية لها أهمية بالغة من وجهة النظر التكنولوجية والعلمية لدورها في تحفيز الشوائب على الانتشار . تلتقط الفجوة البينية في الشبكة البلورية، والذرات في المواضع الاستبدالية يمكنها ان تحفيز بواسطة حركة البينيات الذاتية . من هذا المنطلق زيادة تركيز هذه العيوب من شأنه أن يسرع عملية الانتشار وفق آليات سنستعرضها لاحقا . حيث تنتشر المطعمات في الجيرمانيوم عن طريق هذه العيوب . يتم إنتشارها بالالية الفجوية أو البينية أو

الإثنين معا [18,3].

## 1.6- آليات الانتشار المجهرية :

تنشط المطعومات بإعطائها طاقة كافية للانتشار في المادة الحاملة لها وإعادة توزيعها. ويتم ذلك بمعالجتها

حراريا بتلدينها في درجات حرارة و أزمنة معينة هذا الانتشار يتحقق وفق آليات مختلفة وهي :

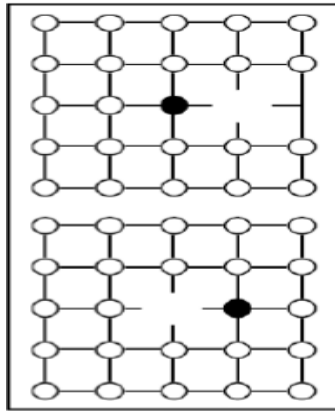
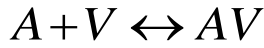
### 1.6.1-الانتشار الفجوي :

يعتمد هذا الانتشار على وجود الفجوات الشكل (23) ويتم وفق الآليات التالية:

#### -الآلية الفجوية :

بوجود فجوة في أحد مواضع الجوار الأقرب تنتقل المطعمة المتواجدة في الموقع الاستبدالي الى موقع الفجوة الجاور.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

مايدعى بالانتشار بالثنائيات و يعبر عنه بالمعادلة التالية [3] :

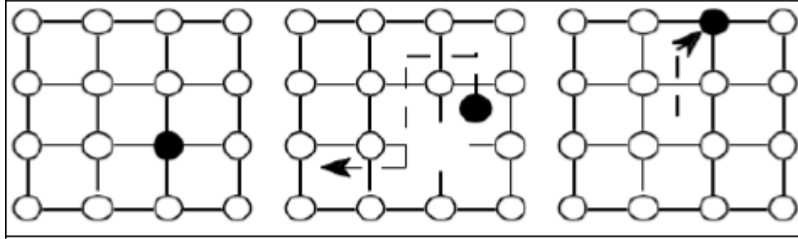
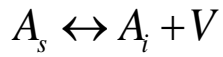


الشكل (23): مخطط بيرزالآلية الفجوية .

- آلية فرانك - تيرنيل :

في هذه الآلية يتم انتقال الشائبة من موضع استبدالي إلى موضع بيني مخلقة فجوة فتنتشر عبر المواقع البينية إلى أن تستقر في موضع

استبدالي عند وجود فجوة. هذه الآلية يعبر عنها بالمعادلة التالية [3] :



الشكل (24): يوضح آلية فرانك - تيرنيل .

### 2.6.1- الإنتشار البيني :

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

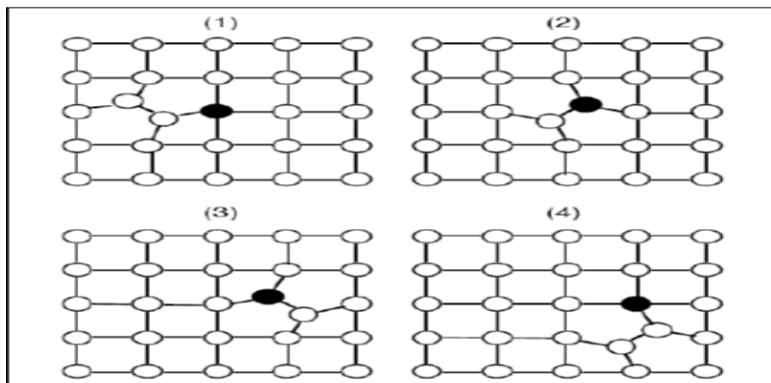
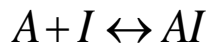
منه :

#### -انتشار المحفر بالبنيات الذاتية :

بوجود بينية ذاتية في أحد مواضع الجوارب الأقرب تنتقل المطعمة المتواجدة في الموقع الاستبدالي الى موقع بيني مجاور

للبنية الذاتية. و بسبب وجود قوة التجاذب بينهما يبقيان مرتبطين مع بعضهما البعض و يشكلان ثنائية شائبة-

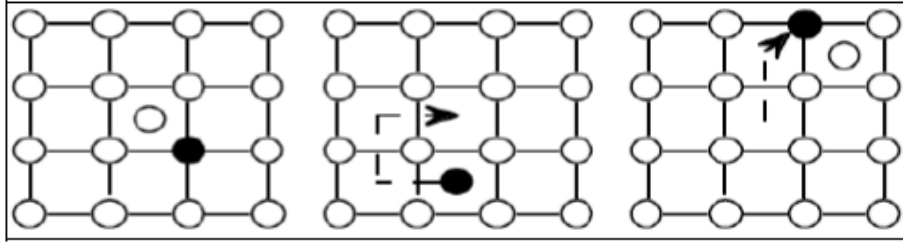
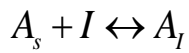
بينية ذاتية. هذه الثنائية تنتقل كمركب واحد في الشبكة البلورية الشكل. هذه الآلية يعبر عنها بالمعادلة التالية :



الشكل (25) : يوضح آلية الإنتشار وفق البنيات الذاتية .

### آلية kick-out

في هذه الآلية تزيح البنية 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 (26). يعبر عن هذه الآلية بتفاعل التالي [3].



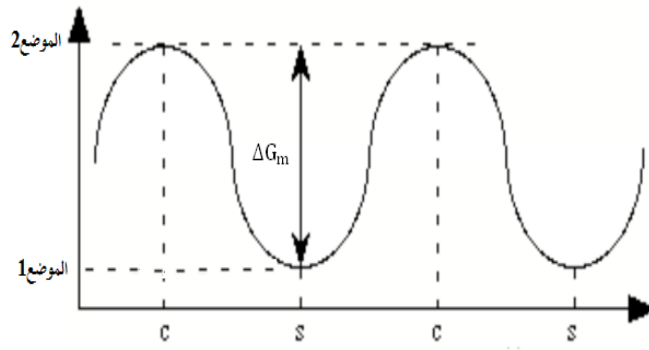
الشكل (26) : يوضح آلية كيك - أوت .

### 7.1- معامل الإنتشار 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 [3].

#### 1.7.1- الدراسة النظرية لمعامل الانتشار:

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



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

هذا التغير يوافق حالة نشاط يمر بها الفرد تعبر  $\Delta G_m$  عن حالة نشاط قبل الوصول الى الموضع 2 ، كما أنها تمثل

الطاقة اللازمة لاجتياز الحاجز للوصول الى الموضع 2 الشكل (29) .

يرتبط معامل الانتشار في حالة كون الانتشار يكون محفزا بالفجوات أو البينيات الذاتية ، بتواتر القفز  $V$  بالعلاقة

التالية [19,20,21] :

$$D = f \cdot \frac{1}{6} a^2 \cdot v \quad (2.2)$$

يمثل  $a$  بعد الجوار الأقرب و  $f$  معامل الإرتباط و  $v$  تواتر القفز .

يساوي تواتر القفز :

$$v = v_x \cdot P_x \quad (2.3)$$

حيث تمثل  $v_x$  تواتر القفز للعيب النقطي وتساوي :

$$v_x = v_0 \exp \left[ -\frac{\Delta G_x^m}{KT} \right] \quad (4.2)$$

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

$$P_x = Z \cdot \frac{C}{C_s} \exp \left[ -\frac{\Delta E_{AX}}{KT} \right] \quad (5.2)$$

في العلاقتين (4.2) و(5.2) تمثل  $\Delta G_m$  طاقة هجرة العيب النقطي

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

$C$  تركيز العيب النقطي عند التوازن الترموديناميكي

$C_s$  كثافة المواقع في الشبكة البلورية

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

$$v = zv_0 \exp\left[-\frac{\Delta G_x^m}{KT}\right] \cdot \exp\left[-\frac{\Delta G_x^f - E_{AX}}{KT}\right] \quad (6.2)$$

$$v = zv_0 \exp\left[-\frac{\Delta G_x^f + \Delta G_x^m - E_{AX}}{KT}\right] \quad (7.2)$$

وبالتالي معامل الانتشار يكتب على النحو التالي :

$$D = f \cdot \frac{4}{6} a^2 \cdot v_0 \exp\left[-\frac{\Delta G_x^f + \Delta G_x^m - E_{AX}}{KT}\right] \quad (8.2)$$

$$D = f \cdot \frac{4}{6} a^2 \cdot v_0 \exp\left[-\frac{\Delta S_x^f + \Delta S_x^m}{t}\right] \exp\left[-\frac{\Delta H_x^f + \Delta H_x^m - E_{AX}}{KT}\right] \quad (9.2)$$

في العلاقة (9.2) تمثل :

$\Delta H_x^m$  أنطالي هجرة العيب النقطي

$\Delta S_x^m$  أنطروي هجرة العيب النقطي

$\Delta H_x^f$  أنطالي تكون العيب النقطي

$\Delta S_x^f$  أنطروي تكون العيب النقطي

وتكون عبارة معامل الانتشار من الشكل :

$$D = D_0 \exp \left[ -\frac{E}{KT} \right] \quad (10.2)$$

يسمى الحد الأنطروي و  $E$  طاقة التنشيط حيث :

$$E = \Delta H_x^f + \Delta H_x^m - E_{AX} \quad (11.2)$$

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

تمثل  $\log D_0$ .

## مراجع الفصل الثاني :

- [1] Mineral Commodity Profiles Germanium – By W.C. Buttermann and John D. Jorgenson – U.S. Geological Survey, Reston, Virginia 2005.
- [2] Cor Claeys , Eddy Simoen , " Germanium-Based Technologies : From materials to devices " , edition bc. Claeys and E. smoen. Elsevier, Amsterdam.2007.
- [3] عبد القادر سويقات ، أطروحة لنيل شهادة الدكتوراه بعنوان دراسة لنصف الناقل الجيرمانيوم المطعم للإستعمال في المكونات الإلكترونية الضوئية ، الجزائر-ورقلة ، 2016/2015م.
- [4] Christmann .P,et all, "panorama mondial 2010 du germanium" ,BRGM/RP,2011.
- [5] بن بادة حولة ، مذكرة لنيل شهادة الماستر ل.م.د بعنوان دراسة بالحاكاة لانتشار الفوسفور في الجيرمانيوم ، جامعة قاصدي مرباح – ورقلة ، 2019/2018م.
- [6] Fiche de synthèse sur la criticité des métaux – Le germanium – Novembre 2015.
- [7] Julien Bonnet ,Docteur de l'Université de Lorraine (Nancy) en Géosciences ، Thèse Présentée pour l'obtention du titre de :Distribution et contrôle cristallographique des éléments Ge, Ga et Cd dans les sphalérites des gisements de type Mississippi Valley dans les districts de Central et East Tennessee, USA, décembre 2014.



[8] SEKKAL ABD-EL-DJALIL, Mémoire Pour L'OBTENTION DU un DIPLÔME DE Master en physique s'intitulé Etude de la réponse d'un détecteur à semi-conducteur germanium hyper pure Application à la spectrométrie des rayons gamma , Université de KASDI MERBAH – OUARGLA ,2018.

[9] malvino ،ترجمة 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/2005م.

[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 إنتشارالمطعمات في السيليسيوم والجيرمانيوم أحادي البلورة ،جامعة قاصدي مرياح ورقلة ،2012م .

[16] A. Bouchekka. these de doctorat, "Adsorption of BSA Protein on silicon, Germanium and Titanium Dioxide Investigated by In Situ ATR-IR Spectroscopy " , université d'oran (2013) .

- [17] هامل عبد الوهاب ، مذكرة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه مهندس دولة بعنوان تطوير نموذج السطح المسنن للخلايا الشمسية للحصول على مردود طاقي عالي ، جامعة باجي مختار – عنابة 2010/2009 م .
- [18] د.سعود بن بزيد اللحياني ، فيزياء الجوامد ، جامعة أم القرى، كلية العلوم التطبيقية ، شعبة الفيزياء الطبية.

- [19] Mehdi Bazizi : «Modélisation physique et simulation de défauts étendus et diffusion des dopants dans le Si, SOI et SiGe pour les MOS avancés»,Thèses Doctorat de L'université' de Toulouse (2010) .
- [20] Scoten W.Jones: « Diffusion in Silicon », IC Knowledge LLC, copyright (2000) .
- [21] AliM.Mousa and Raid A.Ismail: « Analysis of dopant diffusion in Molten Germanium induced by pulsed ND: Yag Laser »,Qatar Univ.Sci.j.15 (2) :301-306(1995).
- [22] B.Boltaks: « Diffusion et Défauts Ponctuels Dans Les Semi-conducteurs », Page(119,181) , Editions Mir. Moscou, (1977).
- [23] S. Brotzmann and H. Bracht: « Intrinsic and extrinsic diffusion of phosphorus, arsenic, and antimony in germanium», Appl. Phys. **103**, 033508 (2008).
- [24] P. Laitinen: « Self- and impurity diffusion in intrinsic relaxed silicon Germanium », thèse dedoctorat, Université de Jyväskylä, Finlande (2004).

الفصل الثالث:

محاكاة ونتائج

تمهيد:

يعد تحديد عمق الوصلة P-N أمر ضروري للتحكم في صناعة المركبات الالكترونية والاكتروضوئية . يعتمد هذا العمق على مجموعة من العوامل تؤثر فيه، ولمعرفتها قمنا في هذا الفصل بدراسة تأثير كل من درجة الحرارة والزمن والتركيز على السطح ونوع المطعمة على هذا العمق .

### 1.3- نمذجة الانتشار:

يحدد عمق الوصلة من خلال محاكاة انتشار مطعمة من نوع n في نصف ناقل مطعم مسبقا بتطعيم من النوع p أو العكس. في دراستنا هذه اعتبرنا الجيرمانيوم مطعم مسبقا بالغاليوم حيث تركيز الغاليوم يساوي  $10^{16}$  ويتم نشر فيه مطعمة من نوع n . اعتمدنا على النموذج الذي يعتبر انتشار مطعمات النوع السالب يتم عبر الفجوات ثنائية الشحنة السالبة وينتج عن ذلك تناسب بين معامل الانتشار ومربع تركيز الالكترونات الحرة في الجيرمانيوم [1] .

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

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

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

$$n = \frac{1}{2} \left( (c-[Ga]) + \sqrt{(c-[Ga])^2 + 4n_i^2} \right) \quad (2.3)$$

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

في حالة الانتشار الذاتي يمكننا أن نكتب:

$$D_i = D^- \quad (3.3)$$

$D_i$  معامل الانتشار الذاتي، وعليه نستطيع أن نكتب:

$$D = \left( \frac{n}{n_i} \right)^2 D_i \quad (4.3)$$

تدفق المطعمة المنتشرة يعطى بالعلاقة التالية [2] .

$$j = -D \frac{\partial c}{\partial x} - Dc \frac{1}{n} \frac{\partial n}{\partial x} \quad (5.3)$$

العبرة الأخيرة يمكن كتابتها على النحو التالي :

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

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

عبرة التدفق يمكن أن نعبر عنها كالتالي :

$$j = - \left( 1 + \frac{C}{2n_i} \left( \left( \frac{C}{2n_i} \right)^2 + 1 \right)^{-1/2} \right) D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (8.3)$$

$$j = -hD \frac{\partial c}{\partial x} \quad (9.3)$$

المقدار  $h$  يدعى بمعامل التسريع الكهربائي حيث :

$$h = 1 + \frac{C}{2n_i} \left( \left( \frac{C - [Ga]}{2n_i} \right)^2 + 1 \right)^{-1/2} \quad (10.3)$$

المقدار  $hD$  يدعى بمعامل الانتشار الفعال :

$$D^{\text{eff}} = hD \quad (11.3)$$

$$j = -D^{\text{eff}} \frac{\partial c}{\partial x} \quad (12.3)$$

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

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

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D^{eff} \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (14.3)$$

### 2.3- محاكاة الإنتشار :

- محاكاة منحنيات الانتشار اعتمدنا على برنامج بلغة الفورترن يعتمد هذا البرنامج على الحل العددي لقانون فيك الثاني باستخدام تقريبات الفروق المتناهية.

- معامل انتشار كل من الفسفور والأرسونيك والانتيموان تم حسابها انطلاقا من العلاقات التالية [1] .

$$D_i(P) = 9.1 \exp\left(-\frac{2.85(eV)}{KT}\right) \quad (\text{cm}^2\text{s}^{-1}) \quad (15.3)$$

$$D_i(As) = 32 \exp\left(-\frac{2.71(eV)}{KT}\right) \quad (\text{cm}^2\text{s}^{-1}) \quad (16.3)$$

$$D_i(Sb) = 16.7 \exp\left(-\frac{2.55(eV)}{KT}\right) \quad (\text{cm}^2\text{s}^{-1}) \quad (17.3)$$

- تركيز الالكترونات الذاتية حسبت بالعلاقة التالية:

$$n_i = 7.3 \times 10^{20} \exp\left(-\frac{0.44(eV)}{KT}\right) \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (18.3)$$

### 3.3- نتائج ومناقشة:

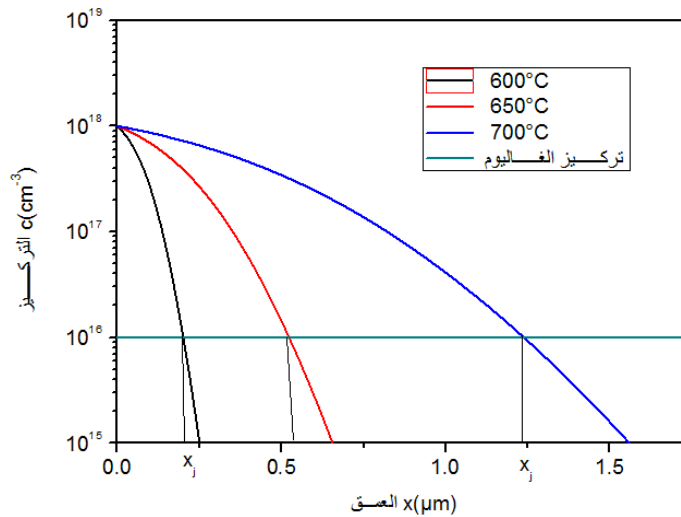
#### 1.3.3- تأثير درجة الحرارة على عمق الوصلة P-N :

من أجل دراسة تأثير درجة الحرارة على عمق الوصلة P-N ، درسنا انتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم حيث قمنا بتثبيت تركيزه على السطح، وتركيز الغاليوم والزمن ، وغيرنا في كل مرة درجة الحرارة. الجدول 6 أدنا يوضح مختلف القيم المستخدمة في المحاكاة .

الشكل (28) يبين تأثير درجة الحرارة على عمق عمق الوصلة P-N.

الجدول (6) : المقادير المستعملة في المحاكاة .

$C_S(\text{cm}^{-3})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$t(\text{s})$	$[\text{Ga}] (\text{cm}^{-3})$
$1 \times 10^{18}$	600	3600	$1 \times 10^{16}$
$1 \times 10^{18}$	650	3600	$1 \times 10^{16}$
$1 \times 10^{18}$	700	3600	$1 \times 10^{16}$



الشكل (28): يمثل تأثير درجة الحرارة على عمق الوصلة .

من الواضح من خلال الشكل أن عمق الوصلة يتعلق بدرجة الحرارة فكلما إرتفعت درجة الحرارة يزداد عمق الوصلة P-N .

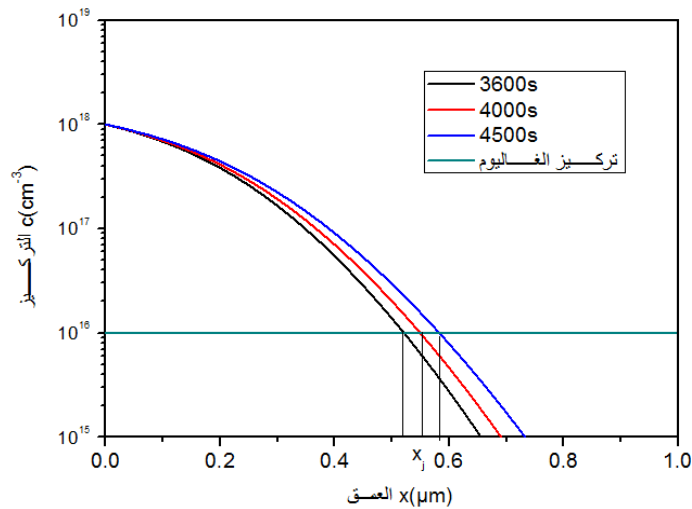
### 2.3.3- تأثير زمن الانتشار على عمق الوصلة P-N:

من أجل دراسة تأثير الزمن على عمق الوصلة P-N ، درسنا إنتشار الأرسونيك في الجيرمانيوم و قمنا بتثبيت التركيز على السطح، وتركيز الغاليوم و درجة الحرارة و غيرنا في كل مرة الزمن . الجدول 7 أدنا يوضح مختلف القيم المستخدمة في المحاكاة .

الشكل (29) يبين تأثير الزمن على عمق عمق الوصلة P-N.

الجدول (7) : المقادير المستعملة في محاكاة .

$C_S(\text{cm}^{-3})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$t(\text{s})$	$[\text{Ga}] (\text{cm}^{-3})$
$1 \times 10^{18}$	650	3600	$1 \times 10^{16}$
$1 \times 10^{18}$	650	4000	$1 \times 10^{16}$
$1 \times 10^{18}$	650	4500	$1 \times 10^{16}$



الشكل (29) : يمثل تأثير الزمن على عمق الوصلة .

من الواضح من خلال الشكل أن عمق الوصلة يتعلق بالزمن فكلما إرتفع الزمن يزداد عمق الوصلة P-N .



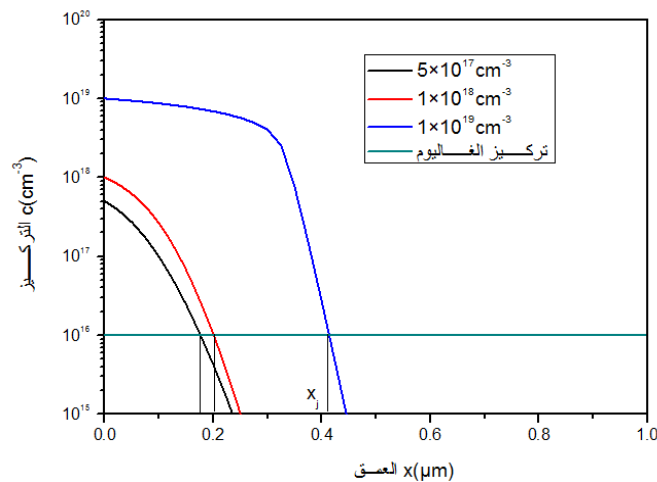
### 3.3.3- تأثير التركيز على السطح على عمق الوصلة P-N:

في هذه الدراسة، قمنا بتثبيت الزمن، وتركيز الغاليوم و درجة الحرارة ، وغيرنا في كل مرة من تركيز الأرسونيك المنتشر على السطح . الجدول 8 أدناه يوضح مختلف القيم المستخدمة في المحاكاة .

الشكل (30) يبين تأثير التركيز على السطح على عمق الوصلة P-N.

الجدول (8) : المقادير المستعملة في محاكاة .

$C_S(\text{cm}^{-3})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$t(\text{s})$	$[\text{Ga}] (\text{cm}^{-3})$
$5 \times 10^{17}$	600	3600	$1 \times 10^{16}$
$1 \times 10^{18}$	600	3600	$1 \times 10^{16}$
$1 \times 10^{19}$	600	3600	$1 \times 10^{16}$



الشكل (30) : يمثل تأثير التركيز على السطح على عمق الوصلة.

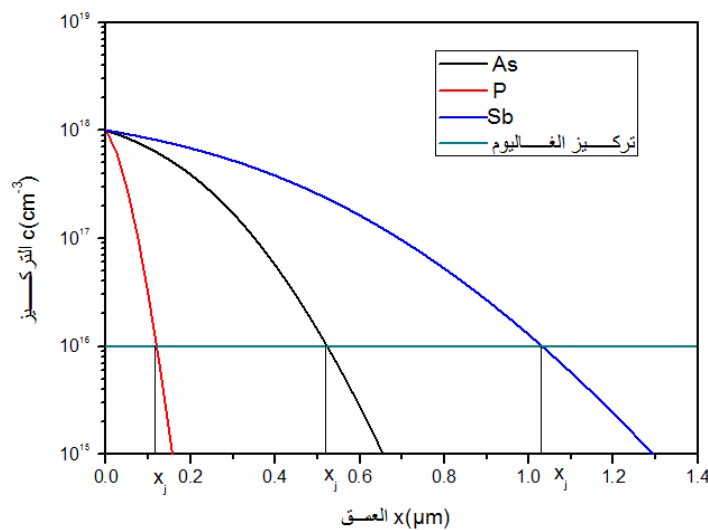
من الواضح من خلال الشكل أن عمق الوصلة يتعلق بالتركيز على السطح فكلما إرتفع التركيز على السطح يزداد عمق الوصلة P-N .

### 4.3.3- تأثير نوع المطعمة المنتشرة على عمق الوصلة P-N:

من أجل دراسة تأثير نوع المطعمة على عمق الإنتشار، قمنا بتثبيت التركيز على السطح، وتركيز الغاليوم و درجة الحرارة ، ونغير في كل مرة نوع المطعمة . الجدول 9 أدنا يوضح مختلف القيم المستخدمة في المحاكاة . الشكل (31) يبين تأثير نوع المطعمة على عمق الإنتشار.

الجدول (9) : المقادير المستعملة في محاكاة .

نوع المطعمة	$C_S(\text{cm}^{-3})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$t(\text{s})$	$[\text{Ga}] (\text{cm}^{-3})$
As	$1 \times 10^{18}$	600	3600	$1 \times 10^{16}$
P	$1 \times 10^{18}$	650	3600	$1 \times 10^{16}$
Sb	$1 \times 10^{18}$	700	3600	$1 \times 10^{16}$



الشكل (31) : يمثل تأثير نوع المطعمة على عمق الإنتشار.

من الواضح من خلال الشكل أن عمق الوصلة يتعلق بنوع المطعمة نلاحظ أن أكبر عمق للوصلة P-N يوافق الأنتيموان .

مراجع الفصل الثالث:

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

الخاتمة العامة

## الخاتمة العامة

تنقسم المواد في الطبيعة من حيث قابلية ناقلتها للكهرباء إلى ثلاثة أنواع : ناقلة ،عازلة و نصف ناقلة. تعتبر المواد

النصف ناقلة مفتاح تطور التكنولوجيات الحديثة. في هذه المذكرة سلطنا الضوء على الجيرمانيوم باعتباره مادة

نصف ناقلة واعدة وبديلة للسيليسيوم لمواصلة سيرورة التطور التكنولوجي الحاصل في هذا المجال . في هذا العمل

درسنا تأثير كل من درجة الحرارة و الزمن والتركيز على السطح و نوع المطعمة المنتشرة على عمق الوصلة P-N

أساسها الجيرمانيوم في شروط الانتشار الذاتي واللاذاتي. فبعد نمذجة ومحاكاة الإنتشار توصلنا إلى مايلي :

— يتأثر عمق الوصلة بدرجة الحرارة والزمن والتركيز على السطح ونوع المطعمة المنتشرة .

— يزداد عمق الوصلة بزيادة كل من درجة الحرارة و الزمن والتركيز على السطح.

- يؤثر نوع المطعمة في نفس شروط الانتشار على عمق الوصلة، حيث لاحظنا أنه في حالة الأنتيموان تكون

الوصلة أ أكثر عمقا.

**ملخص:** تلعب المواد النصف ناقلة دورا أساسيا في التطور التكنولوجي الحاصل في مجال صناعة المركبات الالكترونية والإلكتروضوئية لما تتمتع به من خصائص مميزة جعلتها أساس هذه الصناعة . في هذه المذكرة سلطنا الضوء على الجيرمانيوم باعتباره مادة نصف ناقلة واعدة وبديلة للسيليسيوم لمواصلة سيورة التطور التكنولوجي الحاصل في هذا المجال . في هذا العمل درسنا تأثير كل من درجة الحرارة و الزمن والتركيز على السطح و نوع المطعمة المنتشرة على عمق الوصلة P-N أساسها الجيرمانيوم في شروط الانتشار الذاتي واللاداتي . دراستنا بينت أن عمق الوصلة يتأثر بدرجة الحرارة والزمن والتركيز على السطح ونوع المطعمة المنتشرة حيث يزداد نبهادة كل من هذه العوامل . لاحظنا أن نوع المطعمة يؤثر على عمق الوصلة.

**كلمات مفتاحية:** الجيرمانيوم، الوصلة P-N، الانتشار الذاتي واللاداتي، درجة الحرارة

**Résumé:** Les matériaux semi-conducteurs jouent un rôle très important dans le développement technologique dans le domaine électroniques et optoélectroniques en raison de leurs caractéristiques distinctives qui en ont fait la base de cette industrie. Dans cette note, nous mettons en avant le germanium comme un semi-conducteur prometteur et une alternative au silicium pour poursuivre le processus de développement technologique dans ce domaine. Dans ce travail, nous étudions l'effet de la température, du temps, de la concentration en surface et du type de dopant diffus sur la profondeur de la jonction P-N à base de germanium dans les conditions intrinsèque et extrinsèque diffusion. Notre étude a montré que la profondeur de la jonction P-N est affectée par la température, le temps, la concentration en surface et le type de dopant.

**Mots clés :** germanium, jonction P-N, diffusion intrinsèque et extrinsèque, température