خامساً: ليزر شبه الموصل Semiconductor Laser

شبه الموصل مادة صلبة بلورية فيها تشكل الذرات الفردة شبيكة دورية معامل توصيلها الكهربائي اقل بكثير من معامل التوصيل الكهربائي للفلزات. تختلف عن البلورات الايونية الصلبة الستخدمة في ليزر الحالة الصلبة في طريقة تمثيل مستويات الطاقة وبالتالي ميكانيكية الضخ وعملية الانبعاث الضوئي. تمثل مستويات الطاقة في شبه الموصل صفة عامة من الصفات الداخلية للشبيكة البلورية ككل ولايمكن التكلم عن مستوى طاقة لذرة اوجزيئة منفردة او ايون منفرد في شبه الموصل او ايون مطعم في بلورته. هذا بالاضافة الى ان ليزر شبه الموصل يختلف عن ليزر الحالة الصلبة في اغلب الصفات الفيزيائية والهندسية وابرزها الاختلاف في الحجم، فلا يتجاوز اكبر بعد في ليزر شبه الموصل عن (1 mm) كذلك ان الخصائص الفيزيائية لشبه الموصل ذات العلاقة بعمل الليزر والتي تتغير مع الظروف الخارجية كالضغط ودرجة الحرارة تختلف عن تلك الخصائص وظروف تغيرها للبلورات الايونية او الزجاج في ليزر الحالة الصلبة.

**مستويات الطاقة:** يوضح الشكل (14) مخطط مستويات الطاقة لشبه موصل مثالي (بلورة نقية) حيث يتميز بوجود نطاقين عريضين للطاقة مفصولين عن بعضهما بنطاق طاقة محرم (فجوة) عرضه (Eg) يطلق على هاذين النطاقين بنطاق التكافؤ (VB) ونطاق التوصيل (CB) يتالف كل منهما من عدد كثيف من حالات الطاقة ولا يعبر عن احتماية تواجد الالكترون في مستوى طاقة ما (E) وفي حالة التوازن حسب احصائية ماكسويل – بولتزمان بل يعطى بدلالة توزيع فيرمي – ديراك وبالدالة f(E) التي تعطى بالعلاقة التالية:

$f\left(E\right)=\frac{1}{\left(1+e^{\frac{\left(E-F\right)}{kT}}\right)}$ ………………..(1)



شكل (14): مستويات الطاقة لشبه موصل مثالي

تمثل T درجة الحرارة المطلقة و F طاقة مستوى فيرمي ويقع ضمن نطاق الفجوة، كما ان هذا المستوى يتميز بالاعتبارات التالية: عند الصفر الطلق، T=0 ولقيم F<E اي لنطاق التوصيل تكون f=0 لقيم F>E تكون f=1، اي ان هذا المستوى يمثل الحد بين مستويات طاقة فارغة تماما ومستويات طاقة مملوءة تماما في درجة الصفر المطلق، فنطاق التوصيل فارغ من الالكترونات تماماً ونطاق التكافؤ مملوء بها تماماً وفي هذه الدرجة يعمل شبه الموصل كعازل كهربائي.

في درجة حرارة اعلى من الصفر المطلق (T>0) يتواجد بعض الالكترونات في نطاق التوصيل مخلفة وراءها فجوات الكترونية (موجبة) في نطاق التكافؤ وبناءاً على ذلك يصبح بالامكان سريان نيار كهربائي بين النطاقين.

ان المخطط البسيط الذي يصف مستويات الطاقة لبلورة نقية مثالية تماماً، اما مخطط الطاقة لبلورة حقيقية فيحتمل ان يتضمن مستويات طاقة اضافية نتيجة لوجود العيوب البلورية كالشوائب والفجوات والانفكاكات. ان وجود الشوائب في البلورة يعمل على تحديد عدد الجسيمات التي تعمل كناقلات للتيار (الالكترونات والفجوات) ولهذا تمثل اهمية بالغة في عملية التاهيل العكسي وبلتالي الانبعاث المحفز، وعلى العموم يمكن تصنيف الشوائب الى الانواع التالية: الشوائب المانحة وتقع مستويات الطاقة لها عموماً قرب نطاق التوصيل والشوائب القابلة وتقع مستويات الطاقة لها عادة قرب نطاق التكافؤ واخيراً الشوائب التي تقع مستويات الطاقة لها في عمق نطاق الفجوة والنوعان الاولان هما من الاهمية حيث يتم زرع كليهما عمداً في البلورة لانتاج نوع سالب (n-type) او نوع موجب (p-type) من اشباه الموصلات. في كثير من التطبيقات يتم معالجة شبه الموصل بشوائب من كلا النوعين حيث تنتشر الذرات المانحة في احد جزئي البلورة وتنتشر القابلة منها في الجزء الاخر وتدعى منطقة الالتحام بينهما بالملتقى (p-n junction).

**التاهيل العكسي والضخ الكهربائي:** لغرض نحقيق التاهيل العكسي يجب ضخ عدد من الالكترونات الى منطقة التوصيل وزيادة الفجوات الالكترونية في منطقة التكافؤ فعند تسليط جهد كهربائي بالاتجاه الامامي للملتقى، اي بربط النوع السالب (n) الى القطب السالب للمصدر تتحرك حاملات التيار نحو الملتقى ويلتحمان عنده وينتج عن ذلك انبعاث له صفات الانبعاث المحفز وللمقارنة مع عمل انواع الليزر السابقة فان شبه الموصل الذي يتم تشغيله بجهد امامي لايكون في حالة توازن حراري وذلك لسريان تيار كبيرخلال الملتقى مما يجعل منطقة الملتقى بعيدة عن حالة التوازن وفي هذه الحالة لايمكن تطبيق مبدأ توزيع فيرمي – ديراك على هذه المنطقة.

ان الاستمرار في زيادة عدد الشوائب المانحة في شبه الموصل ولتراكيز اعلى من مقدار معين (1019 atom/cm3) او اكثر تعمل الذرات المانحة وبصورة جماعية على تحطيم البناء الكلي لمستويات الطاقة في شبه الموصل مسببة زحزحة مستوى فيرمي الى الاعلى وعند الاستمرار في زيادة التركيز يخترق مستوى فيرمي نطاق التوصيل ايضاً. لاحظ الطرف الايسر من شكل (15 أ). اما زيادة تركيز الذرات القبلة فتعمل على خفض مستوى فيرمي الى مكان قد يصل تحت الحافة العليا لنطاق لتكافؤ وهذا مبين في الطرف الايمن من الشكل نفسه. عند اختراق مستوى فيرمي لنطاق التكافؤ او التوصيل يطلق على شبه الموصل في هذه الحالة بانه منحلاً.

نستنتج مما سبق ولتحقيق التاهيل العكسيوتنفيذ الضخ الكهربائي يتم باعداد شيه الموصل ليعمل كوسط فعال لليزر، ويتم ذلك باعداد صمام شبه الموصل بملتقى p – n فيه النوع الموجب والنوع السالب منحلا ( اي ان كل منهما مطعما بالشوائب وبتركيز اكبر من (1018 atom/cm3)، الشكل (16) يبين صماما فيه النوعان من مادة واحدة ملتصقتان لتكونا الملتقى في هذه الحالة ملتقى متجانس.



شكل(15): شبه موصل P-n كوسط ليزر (أ) في حالة الاستقرار (ب) عند الانحياز الامامي



شكل (16): مخطط ليزر شبه الموصل

 **الامتصاص والانبعاث المحفز في شبه الموصل:**

عند ربط الصمام بفرق جهد امامي (V) يساوي تقريباً E/e فان المجال الكهربائي كما هو مبين في الشكل (1) سيعمل على ازاحة موضع مستوى فيرمي في كل نوعي البلورة بمقدار يعطى بلعلاقة:

$∆F=eV$ ………………(2)

كما يسبب استخدام الجهد الامامي في حقن حاملات التيار (الالكترونات في منطفة التوصيل في نوع n- ، والفجوات في منطقة التكافؤ في النوع – p) وباتجاهين متعاكسيننحو منطقة الملتقى وبهذا يتم التحامهما في طبقة ضيقة تدعى (بطبقة النضوب) تنبعث عنها الاشعة الطلوبة.

ان مستويات الطاقة والمبينة في النوعين n & p والتي هي ليست في حالة توازن حراري مع بعضها البعض يمكن ان تفسر كالتالي: يحدث في كل نطاق وبصورة سريعة وضعالتوازن الحراري النسبي فيمكن عندئذ وصف التوزيع الالكتروني لمستويات الطاقة في كل نطاق بحالة يطلق عليها (شبه مستويات فيرمي) ويعبر عنها بدالة فيرمي-ديراك وكالاتي:

$f\_{v}=\left(1+e^{\frac{\left(E-F\_{v}\right)}{KT}}\right)^{-1}$…………...….(3)

$f\_{c}=\left(1+e^{\frac{\left(E-F\_{c}\right)}{KT}}\right)^{-1}$………………(4)

اما الملتقى سيكون في هذه الحالة بعيداً عن حالة التوازن ولايمكن معاملته كمستوى فيرمي للانتقال المحفز. عند التحام الكترون مع فجوة موجبة فان الطاقة الكلية تتحرر كفوتون يعطي تردده وفق معادلة بلانك، اي ان:

hν=E2-E1 …………………(5)

ويمثل E2 & E1 طاقة الالكترون في الحالة الابتدائية والنهائية على التوالي، كما يمكن للاكترون وهو في الحالة الابتدائية ان يمتص الفوتون ويرتقي الى نطاق التوصيل وبما ان القوانين العامة للانبعاث والامتصاص للاشعاع الكهرومغناطيسي يصح تطبيقها للاشعة المنبعثة عن الالتحام في ملتقى شبه الموصل فانه يتوقع حدوث الانبعاث المحفز كلما تحرر فوتون.

س: تحت اي ظرف يزيد معدل الانبعاث على معدل الامتصاص في منطقة الملتقى بربح يستطيع تجازو العتبة؟

يعتمد معدل الامتصاص والانبعاث على عدد الفوتونات المتواجدة في المرنان على معامل اينشتاين B للانتقال، كذلك يتناسب معدل الانبعاث المحفز مع حاصل ضرب احتمالية تواجد الالكترون في المستوى الاعلى واحتمالية عدم تواجده في المستوى الاوطأ، في حين يتناسب معدل الامتصاص مع احتمالية تواجد الالكترون في المستوى الاوطأ واحتمالية عدم تواجده في المستوى الاعلى، لذا وللحصول على انبعاث محفز يجب ان يزيد المعدل الزمني للانبعاث المحفز على نظيره للامتطاص، اي يجب ان يكون:

$f\_{c}(1-f\_{v})>f\_{v}\left(1-f\_{c}\right)$ …………(6)

وهذا يتطلب كون fc>fv من المعادلات (3&4)ينتج:

Fc-Fv>E2-E1=hν ………………..(7)

وبما ان (E2-E1) ليس اقل من Eg، لذا يكون:

Fc-Fv>Eg ……………….(8)

وتكافئ هذه المتباينة شرط التاهيل العكسي في الانواع الاخرى من الليزر.

**وصف الجهاز:**

يمثل شكل (17) نموذجاً لليزر شبه الموصل ذو الملتقى p-n تشكل فيه المنطقة المظللة طبقة النضوب. ان اكثر الاوساط الشائعة الاستعمال لمثل هذا النوع هو مادة زرنيخات الكادميوم GaAs , وعموماً يكون الصمام صغير الحجم اذ يكون سمك المادة الفعالة في حدود (1 µm) وهي اكثر سمكاً من منطقة النضوب التي تكون صغيرة جداًفي حدود (0.1 µm)، اما ابعاد الصمام الاخرى فلا يتجاوز الطول والعرض عن (1 mm) اما السمك فلا يتجاوز (0.5 mm). تقطع البلورة بحيث يكون سطحيها متوازيان وسطوحها الاخرى عمودية على بعضهاالبعض وعلى سطح الملتقى، يصقل زوجاً متقابلاً من سطحيها الجانبين ويترك الزوج الاخر خشناً لتقليص الانعكاسات البراقة غير المرغوب فيها ولا يحتاج الوجهان الصقيلان الى الاكساءبطبقة عاكسة ليعملا مرآتي فابري – بيرو لان معامل انكسار شبه الموصل عالي (لبلورة GaAs حوالي 3.6) وبهذا تكون انعكاسية السطوح النهائية (شبه موصل – هواء) حوالي 35% تثبت قطعة الثنائي هذه على قاعدة معدنية صلبة لتشكل قطباً كهربائياً.

بسبب الحيود فان حزمة الليزر تحتل منطقة الملتقى ويكون للشعاع الخارج انفراج كبير نسبياً كذلك تكون كثافة تيار العتبة لليزر شبه الموصل ذو الملتقى المتجانس عالية نسبياً في درجة حرارة الغرفة. تقل هذه الكثافة وبسرعة بانخفاض ظرف درجة الحرارة هذا بسبب كون المقدار fc (1-fv) يزداد مع نقصان درجة الحرارة في حين يقل المقدار fv (1-fc) مع نقصانها وبهذا يزداد الكسب كلما انخفضت درجة الحرارة وكنيجة لهذا فان ليزر شبه الموصل ذو الملتقى المتجانس لايعمل بشكل مستمر (CW) الا في درجات الحرارة الواطئة (درجة الهيدروجين السائل). تم التغلب التغلب على هذه الصعوبة باستخدام تصميم يتضمن زوجاً من الملتقى غير المتجلنس حيث امكن تشغيل ليزر هذا التصميم بشكل مستمر وفي درجة حرارة الغرفة وايضا بكثافة تيار للعتبة اقل منه في حالة التشغيل النبضي. للتشغيل النبضي لليزر شبه الموصل, يسلط مجال كهربائي عبر الوسط على شكل نبضة بطاقة تقارب طاقة الفجوة ويزداد التيار عبر الملتقى بشكل غير خطي مع الجهد المسلط حتى يقترب هذا من طاقة الفجوة حيث تلاحظ الاشعة المنبعثة من جميع الاتجاهات ومجمله طيف ذو نطاق عريض (اشعة تحت الحمراء بنطاق 830-840 nm) وتتغير الاشعة المنبعثة بتغير تيار الملتقى كما تعتمد طول الموجة المنبعثة على تركيز الشوائب وعلى التيار الكهربائي.

يمكن الحصول على قدرة قصوى تقدر بمئات الواط من صمام GaAs عندما يضخ بشكل نبضي وفي درجات حرارة واطئة (77 ok) ولاتتجاوز القيمة القصوى عن 15 Watt في درجة حرارة الغرفة اما تشغيله بشكل مستمر فيعطي قدرة بين(5-10) m W في الدرجة نفسها.

يغطي نتاج ليزر شبه الموصل مدى عريض من الطول الموجي الذي يتراوح بين (0.7 – 30) µm. ان اهم نموذج لهذا النوع من الليزر هو ليزر GaAs كما ان كفائته عالية نسبياً وبمعدل 10% لذا يعتبر ليزر شبه الموصل من انواع الليزر ذات الكفاءة العالية كذلك ان عرض نطاق تذبذب حزمته (1011 Hz) يرشح تشغيله بالصيغة المقفلة، كما يعد ليزر شيه الموصل GaAs من اهم المصادر المستخدمة في الاتصالات الضوئيةالتي تستخدم الالياف الضوئية كوسط ناقل لها. كما ان عمر الصمام طويل (106 hours) كذلك يستخدم في عدد من التطبيقات المهمة تلك التي تتطلب قدرة واظئة (كعمليات القراءة والمسح) ومصدراً ضوئياً باشعاع واقع في منطقة الاشعة تحت الحمراء.

هناك مواد شبه موصلة اخرى ذات اهمية في عمل هذا النوع من الليزر كاملاح الرصاص التي تتذبذب في المدى المتوسط والبعيد من طيف الاشعة تحت الحمراء كما ان انبعاثها يمكن ان يكون ضيقاً جدا ولهذا تقع اهميتها في دراسة الاطياف تحت الحمراء وخاصة لدراسة اطياف التحليل العالي.