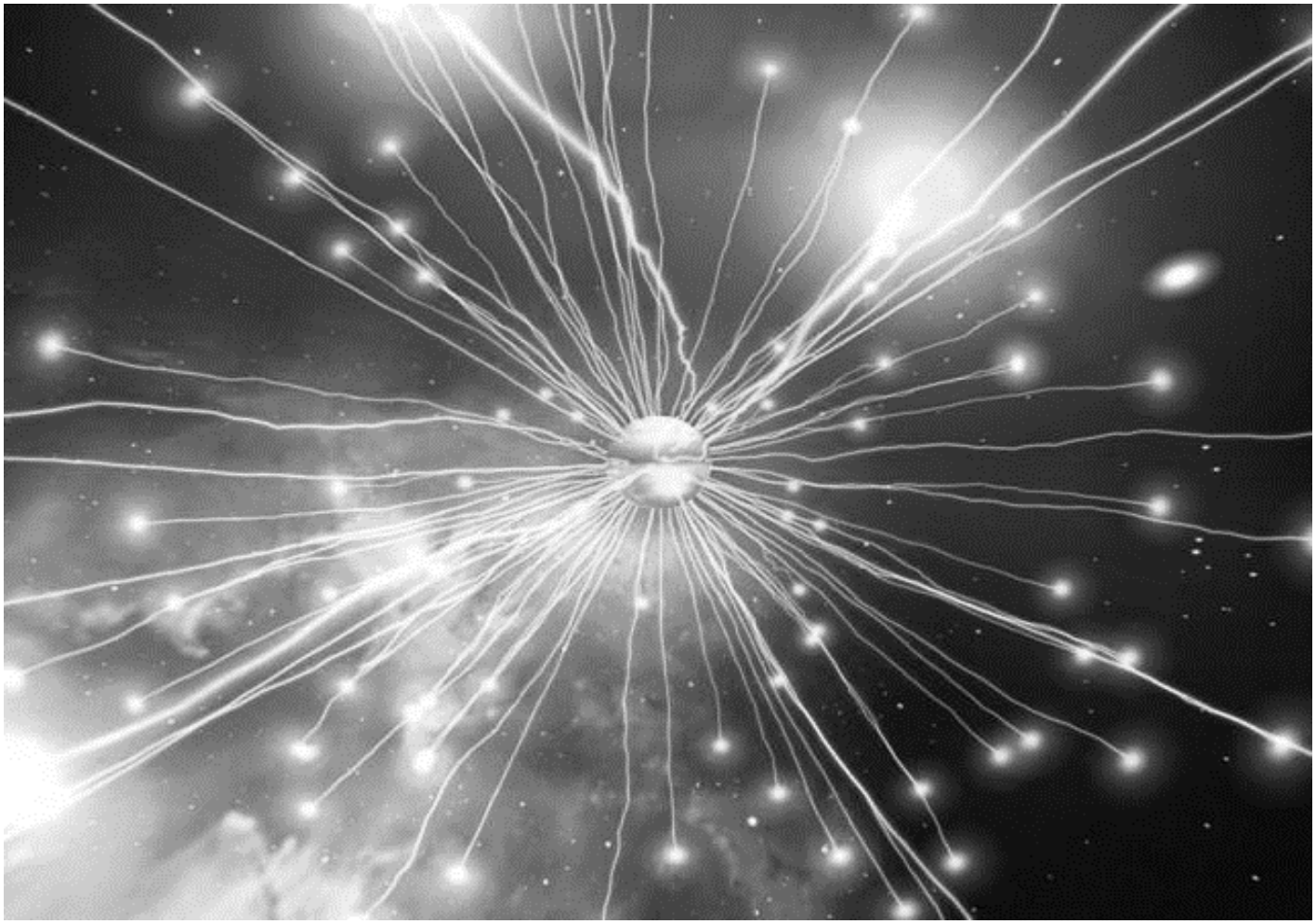


مقدمة في فيزياء البلازما

لطلاب الفرقة الرابعة تعليم أساسي

بكلية التربية

2023/2024

المحتوي

الفصل الأول مقدمة عن البلازما	
الموضوع	الصفحة
مقدمة	2
تعريف البلازما	6
تاريخ البلازما	7
وجود البلازما في الطبيعة	8
أشكال البلازما	9
تسلسل مقادير البلازما	10
أهمية دراسة البلازما	11
أنواع البلازما	12
حالات البلازما المعقدة	12
وصف حالة البلازما	17
الخصائص العامة للبلازما	18
معادلة ساها	19
معاملات البلازما	22
التفاعلات في البلازما	28
بعض ظواهر البلازما الأساسية	29
الفصل الثاني **إنتاج البلازما و التفريغ الكهربائي**	
إنتاج البلازما	35
البلازما الصناعية	37
أمثلة على البلازما الصناعية	39

العمليات الأساسية في التفريغ الكهربائي للغاز	42
أنسياب الالكترونات في الانابيب المفرغة	43
منظومة البلازما	57
الفصل الثالث **تطبيقات البلازما**	
بعض التطبيقات التجارية والصناعية للبلازما	62
مفاعلات الأندماج النووي	63
المولدات المغناطوهيدروديناميكية	65
الدفع النفاث بواسطة البلازما	65
أجهزة ثنائي البلازما	65
البلازما في علوم الفضاء والفلك	67
شاشات البلازما	67
تطبيقات بلازما التفريغ الكهربائي	73

الفصل الاول

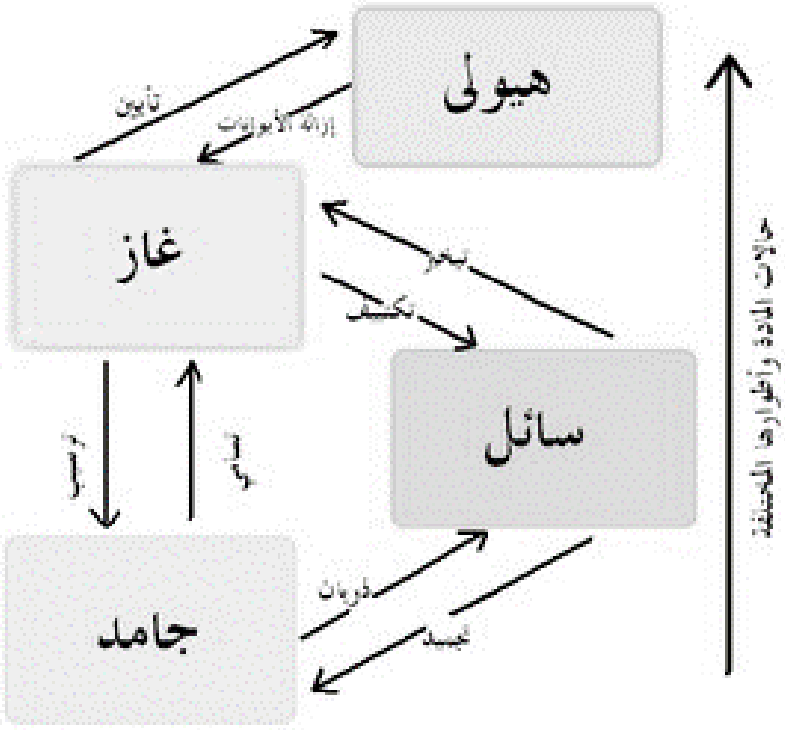
مقدمة عن البلازما

مقدمة

البلازما هي كلمة ذات أصل إغريقي وتعني لغوياً المادة الجلاتينية.وباللغة اليونانية(πλασμα) فيعني أصلا شيئ مكون وفق نظام معين. توجد المادة عادة بثلاث حالات وهي الحالة الصلبة والسائلة والغازية وعن طريق إحداث تغيير في درجة حرارة المادة يمكن إحداث تغيير في حالة المادة. عموماً في جميع حالات المادة تكون ذرات وجزيئات المادة متعادلة كهربائياً أي أن صافي الشحنة يساوي صفر، وهذه الصفة تكون متحققة حتى أثناء عملية تحول المادة من حالة إلى أخرى. في حالة البلازما فإن خاصية التعادل الكهربائي لذرات وجزيئات المادة تختل، ويرتبط مفهوم البلازما عادة بحالة التأين للمادة التي تشكل 99% من المادة الكلية للكون لذا فإن حالة البلازما تشكل أكثر حالات المادة شيوعاً في الكون حيث أن الشمس والنجوم تعتبر كتل كبيرة من البلازما الساخنة، وبعض الكواكب تشكل البلازما أغلب مادتها، حيث يعتبر كوكب المشتري كتلة هائلة من البلازما، حيث أننا نعيش بـ 1% من الكون وهو الجزء الذي لايتكون فيه حالة البلازما.

إن حالة البلازما تطلق على المادة اثناء وجودها بدرجة عالية من التأين أي عندما تكون نسبة عالية من ذرات المادة موجودة بشكل أيونات موجبة مع الكترونات سالبة منفصلة عنها. وأن الصفة التي تميز الحالات واحدة عن الاخرى هي قوة الترابط الجزيئي للجزيئات المكونة للمادة حيث تكون قوية جداً

في الحالة الصلبة وضعيفة في الحالة السائلة وشبه معدومة في الحالة الغازية ومعدومة تقريبا في حالة البلازما، ومن الممكن أن تتحول المادة من حالتها إلى حالة أخرى لذلك تعتبر طورية، أما بالنسبة للبلازما تحدث تدريجياً بازدياد درجة الحرارة للمادة الغازية وأن تحولها من حالة غازية إلى حالة البلازما هو تحول غير طوري كما في الشكل .

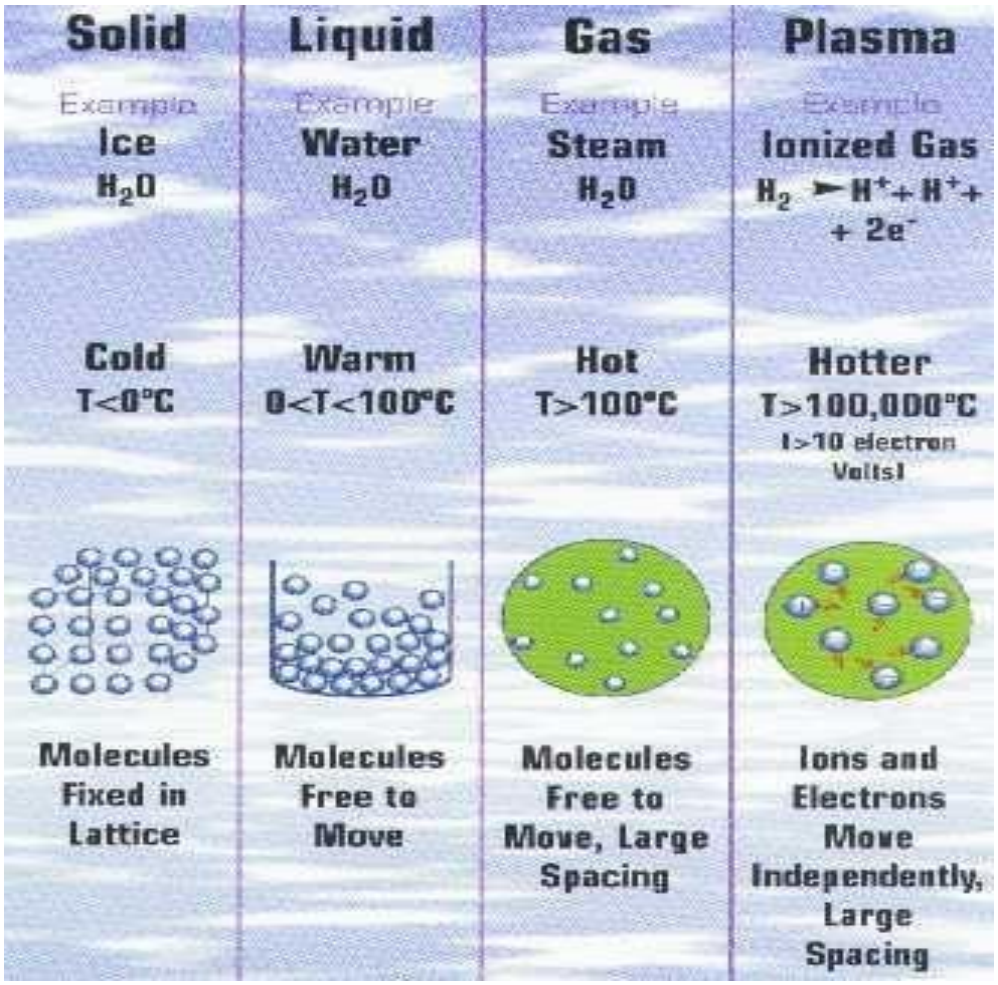


إن عملية التحول تتم عن طريق إكساب الغاز طاقة (عن طريق تسخينة أو عن طريق إمرار تيار كهربائي مرتفع أو ضوء ليزر كثيف من خلاله) حيث أن بعض الذرات تكتسب طاقة كافية لتحرير الكترون سالب الشحنة ليصبح ذو شحنة كهربائية موجبة.

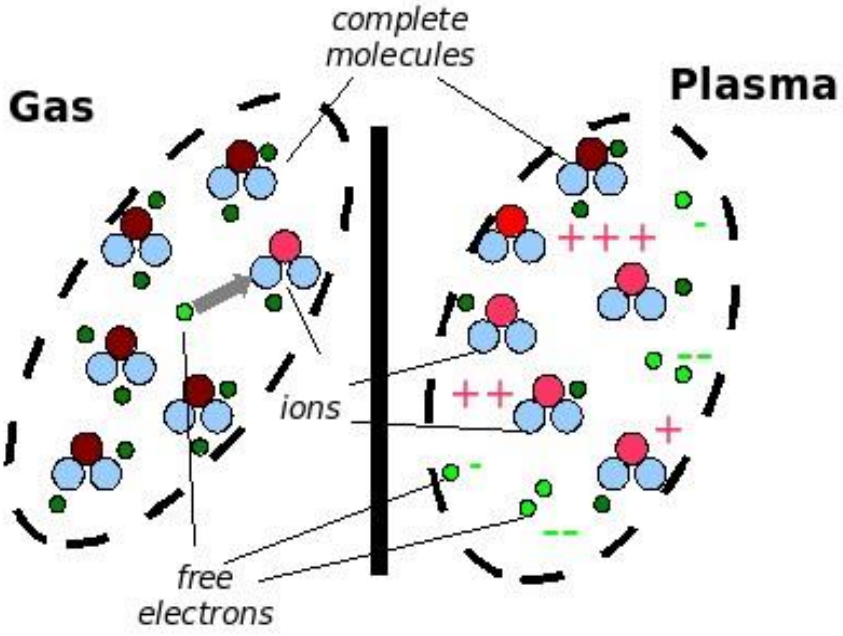
إن الذرة في حالتها المستقرة لاتصدر أي اشعاع ولكن عند اثارتها تبقى في حالتها الاخيرة لمدة 10^{-8} sec كما ويمكن أن تتحول الذرة إلى أيون(ion) بإقتلاع

الكترون أو أكثر من الكتروناتها. وبفقدان الذرة لجميع الكتروناتها فإنها تستطيع أن تتحرك بحرية مع نوى الذرات دون أي إرتباط بها فعند هذة الحالة تكون المادة قد تحولت إلى بلازما.

وعلى سبيل المثال عند دراسة تحول الماء في الحالات الاربعة إعتمادا على درجة الحرارة وصولاً إلى حالة البلازما كما في الشكل .



عليه يمكن تمييز المادة بحالتها الغازية عنها بحالة البلازما بالشكل التالي:



مقارنة بين المادة في حالة الغاز وحالة البلازما:

البلازما هي الحالة الرابعة للمادة وتتميز عن غيرها من الحالات بالطاقة الهائلة التي تمتلكها .وهي ذات صفات مقاربة للحالة الغازية ولكن ليس لها شكل محدد أو كتلة .ينظر العلماء للبلازما على أنها أكثر أهمية من الغاز بسبب الحالات المميزة لها:

الخاصية	الغاز	البلازما
التوصيل الكهربائي	<u>ضعيف جدا</u> الغازات عازل قوي إلا في حالة تحولها إلى مادة بلازمية في مجال كهربائي يفوق في قوته 03 كيلو فولت/سم.	<u>قوي جدا</u> لأغراض عديدة. يمكن أن يعامل التوصيل بالبلازما على أنه غير محدود .

الأنواع التي تمثلها	<u>نوع واحد</u> جميع الجزيئات تتصرف بطريقة مشابهة، تتأثر بالجاذبية وتتصادم مع بعضها البعض	<u>اثنان أو ثلاثة</u> إلكترون أو أيون أو محايد وتتوزع حسب نوع الشحنة وتتصرف عند أكثر الحالات باستقلالية حسب الحجم والسرعة والحرارة وبظهور أنواع جديدة من الموجات وعدم الاستقرارية.
توزيع السرعة	<u>نظام ماكسويل لتوزيع السرعات</u> التصادم يتبع نظام ماكسويل لتوزيع السرعات عند جميع الجزيئات، عدا بعض الجزيئات السريعة .	<u>غير خاضع لنظام ماكسويل</u> تفاعلات التصادم ضعيفة عند البلازما الحارة والقوة الخارجية قادرة على تحريك البلازما من مكانها المتوازن وتؤدي إلى كثافة قوية من الجسيمات السريعة غير العادية .
التفاعلات	<u>مزدوج</u> إصطدام بين جسيمين ونادرا بين ثلاثة .	<u>تراكمي</u> تموج، أو حركة منتظمة للبلازما، مهم جدا لأن الجسيمات تتفاعل لمجالات أبعد خلال القوى الكهربائية والمغناطيسية

تعريف البلازما

تعرف البلازما بأنها حالة وجود شحنات أو تركيز الشحنات السالبة والموجبة لوحدة الحجوم في حالة متساوية تقريباً ومتعادلة كهربائياً.

وقد توجد البلازما من حيث المفهوم بشكل:

1. غاز متأين
2. الحالة الصلبة: كما في أشباه الموصلات حيث توجد الشحنات الموجبة المتمثلة بالفجوات والشحنات السالبة المتمثلة بالالكترونات الحرة الحركة.
3. الحالة السائلة: كما في المحلول الإلكتروليتي أو في ملح منصهر.

أن ابسط الأنواع لدراسة البلازما من الناحيتين العلمية والنظرية هي عندما تكون المادة في الحالة الغازية وذلك لأهميتها الكبيرة ولأنها تمثل الحالة الأوسع من حالات المادة.

تاريخ البلازما

في عام 1879 اكتشف العالم الإنكليزي، السير وليام كروكس، البلازما عن طريق أنبوب كروكس وأطلق عليها آنذاك "المادة المشعة". ثم اكتشف العالم البريطاني جوزيف طومسون خصائص وطبيعة البلازما عام 1897، ويرجع الفضل في تسمية البلازما إلى العالم إيرفينغ لانغمویر في عام 1928، لاعتقاده أنها تشبه بلازما الدم على الأرجح.

وجود البلازما في الطبيعة

معظم المادة الكونية الموجودة في النجوم تكون في درجات حرارة عالية جداً إلى الحد الذي تصبح فيه الطاقة الحركية لذرات المادة كافية لإحداث تأين لهذه الذرات عند عمليات التصادم المتكررة بالاضافة إلى تجهيز طاقة حركية فائضة للأيونات تكفي للتغلب على التنافر الكهروستاتيكي بين الأيونات الموجبة مما يؤدي إلى حدوث تفاعلات إندماج نووي تقوم بدورها بتوليد كميات كبيرة جداً من الطاقة وتعتبر هذه العملية هي الأساس في تولد الطاقة في الكون.

أما على سطح الارض فإن عملية تأين جزيئات الهواء المحيط بالكرة الارضية والناتج عن سقوط الأشعة فوق البنفسجية على الطبقة الهوائية المحيطة بالارض.

وفي الحالات الاعتيادية يجب توفير درجات حرارة عالية لإحداث التأين لذا يتم إنتاج البلازما بمختبرات خاصة. فطاقة التأين تكون بحدود بضع وحدات الكترون فولت (eV) لذا يجب أن تكون درجة الحرارة كافية لإحداث التأين أي مساوية لجهد التأين لذا فان درجة حرارة العتبة تقع بين 10^3-10^5 K^o وقد تصل الى عدة ملايين كلفن.

المصابيح الكهربائية المتفلورة والزئبقية أو الهالوجينية مثال على البلازما كغاز

متأين لكنها تتضمن تأين جزئي لأن البلازما هنا تتعرض لعملية تبريد مستمرة وسريعة من خلال إصطدام الالكترونات والايونات بجدار المصباح البارد.

إن وجود البلازما في درجات حرارية عالية يضع قيوداً علي مسألة إحتواء البلازما فلايوجد وعاء مادي يحتمل درجة حرارة البلازما، لكن تحفظ البلازما ضمن مجالات مغناطيسية بحيث لايسمح للبلازما أن تلامس الجدران المادية للوعاء.

أشكال البلازما

إن أشكال البلازما تتضمن:

1- **بلازما تصدر عن أجهزة صناعية:**

- شاشات البلازما.
- مصابيح التألق (الفلوريسن ذات الطاقة الضعيفة).
- عوادم الصواريخ.
- لحام القوس الكهربائي.
- مصابيح البلازما (كرة البلازما).
- لحفر رقائق الحاسوب لإنتاج أشباة الموصلات.

2- **بلازما طبيعية ارضية:**

- البرق وكرة البرق.
- طبقة الغلاف المتأين.

- الشفق القطبي.

3- **بلازما طبيعية كونية فلكية وفضاء كوني:**

- النجوم.
- الرياح الشمسية.
- الفراغ المحيط بين النجوم والكواكب.
- حلقة احد اقمار المشتري.
- الاقراص الناشئة من تكوين الاجسام النجمية الضخمة.

تسلسل مقادير البلازما

تختلف قيم البلازما حسب القيم الأسّية، لكن خصائص البلازما قد تكون متقاربة جدا كما هو وارد بجدول مقياس البلازما. الجدول التالي يبين البلازما الذرية التقليدية فقط وليس الظواهر الغريبة مثل بلازما الكواركات لأن البلازما هذه تتميز بحالة نووية ذات كثافة مادية هائلة:

تسلسل مقادير البلازما: بالأس العشري		
الميزة	**البلازما الأرضية**	**البلازما الكونية**
الحجم بالأمتار	10^{-6} م (بلازما مختبرات) حتى 10^{2} م (البرق) (~8 مدى بالأس العشري)	10^{-6} م (غلاف سفينة الفضاء) حتى 10^{25} م (سديم المجرات) (~31 أس)
الحياة	10^{-12} ث (البلازما الليزرية)	10^{1} ث (الانفجارات الشمسية)

بالثواني	حتى10^{7} ث (لمبات الفلورسنت) (~19 أس)	حتى 10^{17} ث (بلازما المجرات) (~17 أس)
الكثافة الجسيمات لكل متر مكعب	10^{7} م$^{-3}$ حتى10^{32} م$^{-3}$ (حد الجمود للبلازما)	10^{0}(أي = 1) م$^{-3}$ ما بين المجرات) حتى 10^{30} م$^{-3}$ (باطن النجوم)
درجة الحرارة بالكلفن	0~ك (بلازما متبلورة حتى 10^{8} ك (بلازما الاندماج المغناطيسي)	10^{2} ك (الشفق) حتى 10^{7} ك (باطن الشمس)
المجال المغناطيسي بالتسلا	10^{-4} ت (بلازما مختبرات) حتى 10^{3} ت (البلازما النبضية)	10^{-12} ت (ما بين المجرات) حتى 10^{11} ت (قرب النجوم النيوترونية)

أهمية دراسة البلازما

لقد تم الإهتمام بحالة المادة الرابعة (البلازما) من قبل العديد من العلماء لأهميتها في الكثير من الدراسات والمجالات وتتضمن اهميتها في عدة اسباب:

1 . إن البلازما موصلاً جيداً للتيار الكهربائي ومصدراً للضوء.

2 . إن البلازما هي الحالة الأكثر سعة في عالم منظومتنا الشمسية عند درجات الحرارة العالية.

3 . تعد البلازما نظاماً ديناميكياً تتحكم به القوى الكهرومغنطيسية.

4 . تستخدم البلازما في التطبيقات الصناعية المتعددة.

5 . تعالج مشاكل تقنية مهمة مثل المشاكل التي تجابه بناء مفاعلات الاندماج النووي.

أنواع البلازما

تصنف البلازما وفقاً للدرجات الحرارية الى :

1 . البلازما الباردة (Cold plasma)

هي غالباً ماتكون متأينة جزئياً (ضعيفة التأين) تتراوح درجة حرارتها بين مئات إلى عدة الاف من الدرجات المئوية وبطاقة حركية مقدارها (1eV) ويطلق عليها إسم التفريغ في الغازات وهي النوع المستخدم في أغلب البحوث العلمية.

2 . البلازما الساخنة (Hot plasma)

هي بلازما تامة التأين وتعد الوسط الأساسي التي يمكن أن تحدث فيه تفاعلات الإندماج النووي ومثال عليها بلازما ساخنة توصل إليها الاتحاد السوفيتي سابقاً في معجلات التوكماك (Tokomak) وتتراوح درجة حرارتها بين مئات إلى عدة ملايين من الدرجات الحرارية، وبطاقة حركية بحدود (10eV).

حالات البلازما المعقدة

على الرغم من أن المعادلات التي تحكم البلازما بسيطة نوعاً ما، إلا أن سلوك البلازما غير عادي ومتقلب. يعتبر ظهور تصرف غير متوقع من شكل عادي

تصرفاً طبيعياً من نظام معقد، تتباين مثل هذه النظم - في بعض الأحيان - في سلوكها ما بين النظام والفوضى، ومن الصعب وصفها سواء عبر قوانين رياضية بسيطة أو بالعشوائية التامة. يُعدّ التشكيل العفوي من الميزات المكانية بالسلسلة الواسعة من الجداول الطويلة، أحد مظاهر التعقيد بالبلازما. ويقول الخبراء أن تشكيلات البلازما مثيرة للاهتمام، فهي تظهر حادة جداً على سبيل المثال، وتحيزها متقطع (المسافة بين المجسمات أكبر من الأجسام نفسها) أو تتخذ شكلاً كسرياً. بادئ الأمر، تمت دراسة أغلب تلك الجسيمات مخبرياً، ومن ثمّ تعرف الناس عليها. ومن الأمثلة على تعقيدات وتركيب الأجسام بالبلازما، ما يلي:

- **التفتيل**

الشروخ والقنوات أو الأشياء الضئيلة تظهر في أغلب البلازمات مثل كرة البلازما والشفق والبرق والتقوس الكهربائي ووهج الشمس وبقايا الانفجار النجمي، وهي ترتبط أحيانا مع أكبر كثافة موجودة فتسمى بالحبال المغناطيسية.

- **الكتل أو الطبقات المزدوجة**

تسبب الصفائح الضيقة ذات الحواف الحادة، مثل الكتل أو الطبقات المزدوجة تغيراً سريعاً في خصائص البلازما. تعتبر الطبقات المزدوجة مسؤولة عن تمركز الشحنات المنفصلة التي تسبب اختلافاً كبيراً في الجهد الكهربائي خلال الطبقة. ولكنها لا تولّد أي مجال كهربائي خارجها. تباعد الطبقات المزدوجة بين مناطق

البلازما المتقاربة بأشكال مختلفة وتكون موجودة عادةً في التيارات حاملة البلازما وهي تعجل من سرعة الإلكترونات والأيونات.

- **المجال الكهربائي والدوائر**

تتطلب خاصية شبه الحيادية في البلازما أن تكون تياراتها متقاربة من بعضها البعض في الدوائر الكهربائية، وتخضع هذه الدوائر لقانون كيرشوف للدائرة الكهربائية، وتحتوي على مقاومة وعامل مستحث. ينبغي أن تعامل تلك الدوائر كنظام مزدوج قوي، كل منطقة بلازما مستقلة بسلوكها في الدائرة الداخلية. وهذا الترابط القوي بين عناصر النظام معاً مع عدم الاستقامة هو ما يقود إلى سلوك البلازما المعقد. تخزن الدوائر الكهربائية بالبلازما طاقة مستحثات (مغناطيسية)، وإن كانت تلك الدائرة معطلة عند عدم استقرار البلازما مثلاً، فسيؤدي هذا إلى خروج الطاقة المستحثة كمسخن ومسارع للبلازما، وهذا هو تفسير الحرارة التي توجد في الهالة الشمسية. يلاحظ التيار الكهربائي، وبالتحديد المجال المغناطيسي المصطف مع التيار الكهربائي (الذي يشير أحياناً إلى تيارات بيركلاند)، يلاحظ عادة بالشفق الأرضي وفي فتائل البلازما.

- **البناء الخلوي**

من الممكن عزل الصفائح الضيقة ذات الحواف حادة المناطق مع خواصها المختلفة، المغناطيسية والكثافة والحرارة، مما ينتج مناطق تشبه الخلايا. من الأمثلة على ذلك: المحيط المغناطيسي والمحيط الشمسي وغطاء المجال

الشمسي. كتب العالم هنز ألفن يقول: "وجهة نظر علماء الكون هي أن لعلّ أبرز أبحاث اكتشافات الفضاء هي بنية الكون الخلوية. كما تبين في كل منطقة من مناطق الفضاء التي يمكن الإطلاع عليها في الموقع، هناك عدد من الجدران الخلوية وصفائح التيار الكهربائية التي تقسم الكون إلى أقسام مع اختلاف بالقوة المغناطيسية والحرارة والكثافة...الخ".

سرعة التأين الحرجة

هي السرعة النسبية ما بين البلازما المتأينة والغاز المحايد حيث يحصل التأين للغاز. عملية التأين الحرجة هي تقنية عامة لتحويل طاقة الحركية لدفق الغاز السريعة إلى طاقة البلازما أو التأين الحرارية. وبحال تم ضخ كمية أكبر من الطاقة، فإن سرعة الذرات أو الجزيئات لن تتعدى سرعة التأين الحرجة حتى يكون الغاز كامل التأين. هذه الظاهرة الحرجة هي حالة نموذجية من نظام معقد يمكنها أن تنتج ميزات مكانية أو زمانية شديدة.

- **البلازما شديدة البرودة**

من الممكن إنتاج بلازما شديدة البرودة باستخدام شعاعيّ ليزر، أحدهما يمسك ويبريد الذرات المحايدة إلى درجة حرارة تعادل 1 ملليكلفن أو أقل، والآخر يؤين الذرات بواسطة إعطاء الإلكترونات الأبعد طاقة كافية للخروج من مجالها الذري. النقطة المهمة في البلازما شديدة البرودة هي معالجة الذرات بدقة بواسطة الليزر، والسيطرة على الطاقة الحركية للإلكترونات المتحررة.

باستخدام ليزر نبضي معين، يمكن إنتاج طاقة إلكترون مقارنة لدرجة حرارة صغيرة تعادل 0.1 كلفن، ويكون نطاق تردد الليزر النبضي محدد سلفاً، فالأيون يحافظ على درجة حرارة تساوي ملليكلفن في الذرة المحايدة. هذا النوع من البلازما شديدة البرودة غير المتوازنة ينشأ بسرعة، ويضع علامات استفهام كثيرة حول هذا السلوك دون أن تتوافر إجابة لها، وقد أفضت التجارب إلى كشف ديناميكات غريبة وسلوك إعادة الارتباط مما زاد من حدود المعرفة الإنسانية بعلم البلازما. إحدى الحالات غير المستقرة للبلازما غير المثالية هي حالة ريدبرج، حيث تتشكل البلازما من تكثيف الذرات بالإثارة.

- **البلازما اللاحيادية**

البلازما الحيادية هي تلك البلازما ذات الإلكترونات القوية وجودة التوصيل التي تضمن عادة تعادل كثافة الشحنات السالبة والموجبة لكل نطاق محدد. أما البلازما المحتوية على كمية إضافية من كثافة شحنة معينة، أو في بعض الحالات قصوى، تكون ذات صنف واحد فقط، فتعرف بالبلازما اللاحيادية. وفي هذ النوع من البلازما، يلعب المجال الكهربائي دورا رئيسيا، ومن أمثلة هذا النوع: حزمة الجزيئات المشحونة والغيوم الإلكترونية والبلازما البوزيترونية (جسيم مضاد مساوي لكتلة الإلكترون ذو شحنة موجبة).

- **البلازما المغبرة والبلازما الحبيبية**

توجد البلازما المغبرة عادة بالفضاء الخارجي، وتتميز بوجود الغبار فيها فإذا

صارت الجسيمات أكبر فتكون حبيبية، ولها ذات تصرفات البلازما.

وصف حالة البلازما

لوصف حالة البلازما تماما، يحتاج المرء أن يعرف أماكن وسرعة الجسيمات ووصف المجال الكهرومغناطيسي بمنطقة البلازما، لكن لا يعد ضروريا فحص جميع الجسيمات بالبلازما، لهذا السبب يقدم الفيزيائيون وصفا أقل دتفصيلا للنماذج المعروفة، التي يقسمونها إلى نوعين مهمين:

- **نموذج الموائع**

يصف نموذج الموائع البلازما من حيث الكميات السهلة مثل الكثافة والسرعة المتوسطة حول كل موقع. أحد نماذج الموائع البسيطة هي نظرية الديناميكية الهيدرومغناطيسية (ديناميكيات الموائع الموصلة في مجالات كهربائية ومغناطيسية شبه مستقرة، وهذه الموائع قد تكون معادن فلزية سائلة كالزئبق أو الفلزات القلوية المنصهرة أو قد تكون عبارة عن غاز ضعيف التأين أو بلأزمات) وهي تتعامل مع البلازما كمائع وحيد محكوم بتركيبة من "معادلات ماكسويل" و"معادلات نافير-ستوك". أما الوصف الآخر هو نظام الموائع الثنائي، حيث تعامل الإلكترونات والأيونات معاملة منفصلة. يكون نظام الموائع دقيقا إذا كان الاصطدام عالي بدرجة كافية تؤدي لإيصال توزيع سرعة البلازما بشكل قريب لقانون "توزيع ماكسويل بولتزمان". والسبب أن نظام الموائع يصف البلازما كمجرى واحد بدرجة حرارة محددة لكل موقع مكاني، أنه لا يمكنه

اصطياد سرعة الأجسام الفضائية مثل الشعاع أو الطبقات المزدوجة ولا يحل تأثير أجسام الموجات.

- **النموذج الحركي**

هذا النموذج يصف توزيع سرعة الجسيم لكل نقطة بالبلازما، لذا لا يحتاج المرء للجوء إلى قانون توزيع ماكسويل بولتزمان لوصف البلازما رياضيا. يعتبر وصف الحركة ضروريا بالنسبة للبلازما عديمة الاصطدام. وهناك طريقتان معروفتان لوصف الحركة بالبلازما، الأولى تعتمد وظيفة التوزيع السهل على الشبكة في السرعة والموقع، أما الأخرى فتسمى "تقنية الجزيء في الخلية"، وتضم المعلومات الحركية باتباع مسارات أعداد كبيرة من الجزيئات الفردية. يعتبر النموذج الحركي أكثر كثافة حسابيا من نموذج الموائع، ويستخدم معادلة فلاسوف لوصف نشوء نظام الجزيئات بالبيئة الكهرومغناطيسية.

الخصائص العامة للبلازما General properties of plasma

1 .البلازما على الأغلب تكون غير متجانسة (درجة الحرارة، التركيز، المجال المغناطيسي).

2. البلازما غالبا ما تكون متباينة الخواص أي أن خواصها تعتمد على الإتجاه.

3.البلازما مبددة أي أن الطاقة الميكانيكية أو الكهرومغناطيسية ممكن أن تتحول إلى حرارة.

4. البلازما موصلة للكهربائية حيث يظهر حث فارادي عند تحرك البلازما.

5. البلازما لزجة أي أن الطاقة الميكانيكية تتبدد إلى الحرارة وتظهر طبقات بين أطراف البلازما.
6. البلازما موصلة للحرارة بحيث يمكن نقل الحرارة من خلال البلازما إلى جسم أخر.
7. البلازما شفافة وغير شفافة للموجات الراديوية إعتمادا على الطول الموجي.
8. البلازما ذات نفاذية مغناطيسية ضعيفة لذلك البلازما تعمل على إضعاف المجال المغناطيسي.
9. قد تكون في حالة توازن ميكانيكي عند إحتوائها بمرآة مغناطيسية (عندها لاتكون في حالة توازن ثرموديناميكي).

معادلة ساها Saha Equation

في كل غاز متأين تتراوح نسبة التأين مابين الصفر والواحد وتعتمد هذه النسبة بشكل مباشر على مقدار الطاقة الحركية التي تمتلكها جزيئات الغاز أو يمكن القول تعتمد بشكل مباشر على درجة حرارة الغاز.

أن الغاز في حالة تأين جزء منه سيكون عبارة عن نظام مكون من الذرات المتعادلة والأيونات الموجبة والألكترونات وتحديد نسبة كل من هذه المكونات يحدد درجة تأين الغاز. العالم ساها(1920) أستخدم طريقة لحساب درجة تأين أي غاز.

أعتبر ساها عملية التأين عملية عكسية أي أنه في نفس الوقت الذي يتم فيه خلق أيونات والكترونات جديدة داخل الغاز فأن هناك أيونات اخرى تقوم

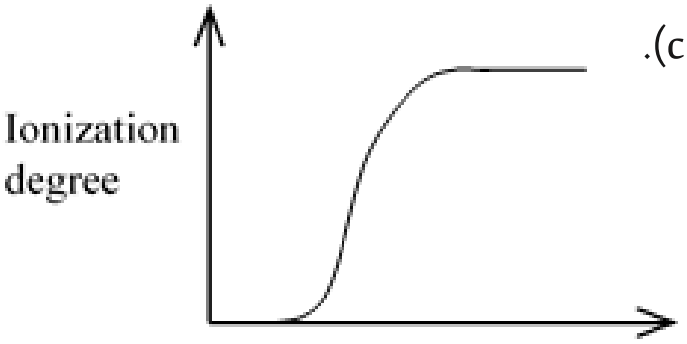
بالأتحاد مع الألكترونات لتكوين ذرات متعادلة وبشكل مشابه تماماً لما يحدث في حالة تفاعل كيميائي عكسي، أي بالصورة التالية:

$$A + \text{طاقة} \Leftrightarrow A^{+} + e^{-}$$

وهذا الأفتراض يعني إهمال حالات الإثارة للذرات حيث تم أعتبار الحالات الموجودة على أنها حالتان فقط وهما حالة الذرة المتعادلة وحالة الأيون. وصيغة معادلة ساها في حالة التوازن الحراري (Thermal equilibrium) والتي تمثل نسبة التأين المتوقعة في الغازات هي:

$$\frac{n_i}{n_n} \cong 2.4 \times 10^{15} \frac{T^{3/2}}{n_i} e^{-u_i/KT}$$

حيث:



n_i : تركيز الذرات المتأينة (الأيونات cm^{-3}).

n_n : تركيز الذرات المتعادلة.

T : درجة الحرارة المطلقة (K^o).

K : ثابت بولتزمان.

u_i : طاقة تأين الغاز (جهد التأين). ويمكن تمثيل معادلة ساها بالعلاقة التالية:

معادلة ساها فيزيائياً تعني أن ذرات الغاز(n_n) تمتلك طاقات حرارية منفصلة وعندما تكون هذه الطاقات منخفضة فإن التصادمات الطاقية (Energetic collision) سوف تكون نادرة الحدوث لأن الذرة يجب أن تكون معجلة لطاقة أعلى من معدل طاقة التأين بوساطة التصادمات، أما عندما تكون الطاقات الحرارية عالية فإن الذرة تتأين عندما تعاني من التصادم مع الإلكترون بطاقة

عالية.

أما بالنسبة للجزء الاسي ($e^{-ui/KT}$) فإنه يبين ان عدد الذرات ذات السرع العالية يهبط أسياً مع المقدار (u^{i}/KT) وأن الذرة التي تكون متأينة ستبقى مشحونة حتى تلاقي الإلكترونات وتعيد إتحادها معها لتصبح متعادلة مرة اخرى، إن معدل اعادة الاتحاد(Recombination rate) يكون معتمداً على كثافة الإلكترونات والتي يمكن جعلها مساوية لـ n_i لذلك فإن تعادل كثافة الأيون سوف يقل مع n_i. وعليه فإن معادلة ساها توضح أنه بإرتفاع درجة حرارة الغاز تزداد كثافة الجسيمات المتأينة وبعد أن تتجاوز درجة الحرارة لطاقة التأين تسمى في هذه الحالة البلازما وقد تكون البلازما ضعيفة أو جزئية أو كاملة التأين إعتماداً على n_i (كثافة الجسيمات المتأينة).

وتكون البلازما متأينة عندما $n_i > n_n$ حيث تكون نسبة التأين اكبر من 10^{-4}، لكنها تكون ضعيفة التأين عندما $n_i < n_n$ حيث تكون نسبة التأين اقل من 10^{-4}. ففي درجة حرارة الغرفة تكون نسبة التأين منخفضة جداً وهذا مايفسر صعوبة الحصول على بلازما كاملة التأين في المختبر.

ولتوليد البلازما مختبرياً نقوم بتسليط فرق جهد على غاز تحت ضغط معين بحيث تكون الطاقة كافية لإثارة ذرات الغاز عند زيادة الطاقة يزداد معدل إثارة الجسيمات الذرية والجزيئية ويحصل إنفصال لجزيئات الغاز فيؤدي إلى حدوث تأين ولكي تبقى البلازما في حالة شبة الإستقرار تحدث عمليات إعادة الإتحاد بين الجسيمات المشحونة والمتعادلة بحيث تكون أزواج أيون-الكترون بشكل

مستمر والتي تتكون بواسطة عمليات إعادة الإتحاد والإنفصال وعمليات التأين وكما موضح في المعادلات الاتية:

$AB + e^- \longrightarrow A + B + e^-$ أنفصال

$AB + e^- \longrightarrow AB^+ + e^-$ تأين

$AB + e^- \longrightarrow AB^* + e^-$ إثارة

$AB + e^- \longrightarrow A + B^+ + e^-$ إنفصال تأين

$A^+ + B + e^- \longrightarrow AB$ إعادة اتحاد

معاملات البلازما Plasma Parameters

☒ درجة الحرارة في البلازما غالبا ما نتحدث عن درجة حرارة الإلكترونات T_e حيث ان:

$$< E >= \frac{3}{2} KT$$

ولكون T و $< E >$ مرتبطين مباشرة لذا يمكن التعبير عن درجة الحرارة T في فيزياء البلازما كمقدار طاقة ووحدتها تعتبروحدة طاقة. وعادة ما تفهم تحت مفهوم الحرارة KT فمثلاً عندما $KT=1eV$ يكون $KT=1.6x^{-19}$ فيكون لدينا:

$$T = \frac{1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23}} = 11600K^o$$

عليه $1\ eV = 11600K^o$

من المفيد أن نشير أن بلازما معينة يمكن أن تمتلك عدة درجات حرارة في نفس الوقت، وغالبا ماتمتلك الإلكترونات والأيونات توزعين مختلفين لدرجتي حرارة مختلفتين T_e و T_i وهذا ممكن لأن تكرار تصادمات الأيونات فيما بينها أو بين

الإلكترونات فيما بينها، ممكن أن تكون أكبر من تكرار تصادمات الإلكترونات والأيونات وعندئذ كل نوع من الجزيئات يمكن أن يوجد في حالة توازن حراري مستقلة عن حالة النوع الاخر. وفي حالة وجود مجال مغناطيسي فإنه حتى في النوع الواحد من الجزيئات وليكن الأيونات يمكن أن توجد في درجتي حرارة مختلفتين وذلك لإختلاف إتجاه القوة المغناطيسية المؤثرة عليها.

☒ تردد البلازما Plasma Oscillation

إن وجود الألكترونات ضمن المجالات الكهروستاتيكية للأيونات الموجبة في البلازما سوف يفترض بعض التحديدات على حركة سيل من الألكترونات والأيونات. فلابد من حدوث إهتزازات في البلازما نتيجة لوجود القوى الكهروستاتيكية العاملة بين الشحنات الموجبة والسالبة والتي تحاول إعادة البلازما إلى وضع الأستقرار عند التأثير بأي مؤثر يحاول الأخلال بهذا الأستقرار.

فعند تصادم الجسيمات المشحونة مع الذرات المتعادلة عندها تتسبب الأخيرة بتذبذب الجسيمات المشحونة بتردد معين يعتمد على القوى الهيدروديناميكية والكهرومغناطيسية الموجودة. وهذا التردد يعطي بالعلاقة:

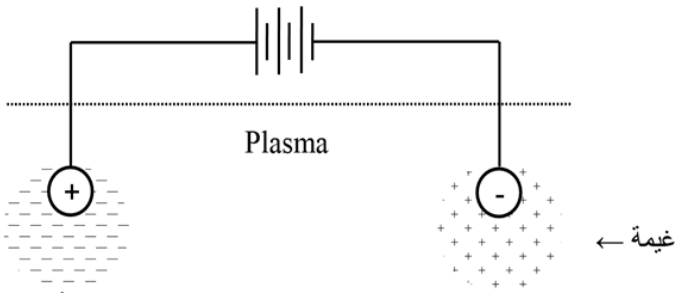
$$W_P = \left(\frac{n_i e^2}{\epsilon_o m}\right)^{1/2}$$

وهذا التردد يعطي في أغلب الأحيان للألكترونات لأن تردد الأيونات الموجبة يكون قليل مقارنة بتردد الالكترونات كون كتلتها تكون كبيرة مقارنة بكتلة الألكترونات.

☒ حجب ديباي Debye Shielding

إن البلازما المتعادلة من خلال تساوي عدد الأيونات الموجبة والسالبة هي ليست بالضرورة خالية من المجالات الكهربائية الموضعية داخل البلازما والناتجة عن تواجد الأيونات والإلكترونات. إن لهذه المجالات الموضعية مدي أقل بكثير من مدى جهد كولوم للشحنات المستقرة والذي يكون لانهائي .

فلمعرفة المدى المؤثر للجهد الكهربائي للشحنة داخل البلازما نفترض وضع مجال كهربائي داخل البلازما من خلال وضع كرتين مشحونتين مربوطتين ببطارية.



إن كل كرة من الكرات المشحونة سوف تتسبب في تفريق الشحنات المشابهة لها في منطقة المجال المحيط بها في حين تتجاذب مع الشحنات المعاكسة لها. وهذا الفصل في الشحنات سوف يؤدي إلى تغيير شكل المجال في البلازما. فإن أحد المميزات الأساسية في توليد البلازما هي مقدرتها على إختزان أو حجب الجهود الكهربائية التي تتولد فيها.

في حالة البلازما الباردة أي لاتوجد حركة حرارية عندها يكون حجب البلازما تام وسوف لاتظهر أي مجالات كهربائية خارج حدود الغيمة المحيطة بالكرة. لكن عند أرتفاع درجة الحرارة فأن الجسيمات عند حدود الغيمة والتي يكون بها المجال الكهربائي ضعيف تمتلك طاقة حرارية كافية للهروب من هذا المجال الكهروستاتيكي.

لذا فأن هذه الغيمة ستكون بنصف قطر حيث أن الطاقة الكامنة مساوية تقريباً للطاقة الحركية للجسيمات، أي سوف يكون الحجب غير تام في هذه الحالة.

إن الجهد الكهربائي الناتج بعد فصل الشحنات يعطي بالعلاقة:

$$\phi = \phi_o e^{-|x|/\lambda^D}$$

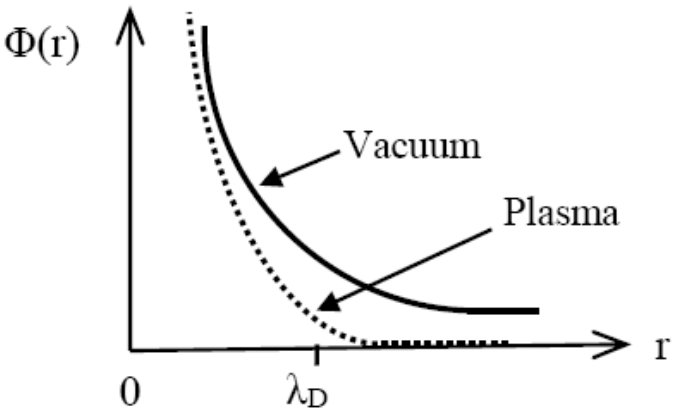
لذا فهو عبارة عن حاصل ضرب جهد كولوم الأعتيادي ϕ_o في معامل أسي يقل تبعاً لزيادة المسافة (x) والمقدار (λ_D) الذي يسمى بطول ديباي أو مسافة الحجب، وطول ديباي يعطي بالعلاقة:

$$\lambda_D = \left(\frac{k\,T_e}{4\pi n e^2}\right)^{1/2}$$

فطول ديباي الذي يمثل مقياس لمسافة حجب البلازما، يمكن تعريفه على أنه المسافة التي يتم خلالها معادلة المجال الكهربائي الناتج عن الجسم المشحون بواسطة التأثير الناتج عن فصل الشحنات الموجبة والسالبة عن بعضها.

فنلاحظ أن تأثير جسيمات الغيمة سوف لايكون محسوساً بدرجة كبيرة عندما

مسافات (x) أقل من (λ_D) في حين ينخفض جهد الأيون بحيث يصبح غير محسوس نهائياً كلما أبتعدنا وأصبحت (x) أكبر من (λD).



أي أن البلازما المحيطة بأي جسم مشحون موجود داخلها سوف تقوم بعملية حجب تأثير ذلك الجسيم في النقاط التي تبعد عن الجسيم بمسافات أكبر من (λ_D).

ويمكن أن تعطى (λ_D) بالعلاقات التالية أيضاً :

$\lambda_D = 6.9(T/n)^{1/2}$ (cm) $T(K^o)$

$\lambda_D = 740(kT/n)^{1/2}$ (cm) KT (eV)

يمكن أيجاد عدد الجسيمات (ND) الموجود في غيمة حجب ديباي من خلال أفتراض أن هذه الغيمة لها شكل كروي:

$$N_D = n\frac{4}{3}\pi\lambda_D^3 = 1380T^{\frac{3}{2}}/n^{1/2}$$

ويطلق على N_D في أغلب الأحيان معامل البلازما Plasma Parameter وللمسافات أقل من (λ_D) تصبح علاقة N_D غير صحيحة لأنها تفقد السلوك الجماعي Collective Behavior.

أما في حالة السلوك الجماعي للبلازما فتصبح N_D :

$N_D >>> 1$

مما سبق يجب أن يتوفر بالبلازما الشروط التالية:

1. اي ان البلازما يجب ان تكون كثيفة كفاية بحيث $\lambda D << L$ حيث L : طول نظام البلازما والتي تمثل البعد الخطي لمجموعة الجسيمات المشحونة.
2. يجب وجود عدد كاف من الجزيئات ضمن غيمة الشحنات، وبالتالي فان السلوك الجماعي يتطلب تحقيق الشرط: عدد الجزيئات في كرة ديباي واحدة اكبر بكثير من واحد $ND <<< 1$
3. ان يكون تردد اهتزازات البلازما ومعدل الزمن بين تصادم واخر يكون $\omega\tau < 1$

حيث ان غاز ضعيف التأين في محرك صاروخي مثلا ليس بلازما، لان الجزيئات المشحونة تصطدم بالجزيئات المعتدلة غالباً والتي تكون حركتها مرتبطة بقوى هيدروديناميكية عادية اكثر من ارتباطها بقوى كهرومغناطيسية. اذ لكي يكون غاز ما بلازما يجب تحقق:

$$\lambda_D << L, \quad N_D >>> 1, \quad \omega\tau > 1$$

تفاعلات الجسيمات والآثار الجماعية

يعتبر وصف البلازما على أنها وسط متعادل من الجسيمات سالبة و موجبة الشحنة، وصفاً ضعيفاً تعوزه الدقة وذلك لأن تعريف البلازما لابد أن يتضمن معايير اخري مما يعطى دقة أكثر. حيث تعتمد خصائص البلازما بشكل ملحوظ على تفاعلات الجسيمات. واحدة من السمات الأساسية التي تميز سلوك البلازما

من السوائل والمواد الصلبة العادية هي وجود التاثير الجماعي. بسبب القوى الكهرومغناطيسية، يتفاعل كل جسيم مشحونة في البلازما في نفس الوقت مع عدد كبير من الجسيمات المشحونة الأخرى، مما يؤدي إلى آثار جماعية مهمة مسؤولة عن ثروة الظواهر الفيزيائية التي تحدث في البلازما.

تخضع الجسيمات في البلازما للحقول المغناطيسيه الداخلية (و يعتمد المجال علي طبيعة وحركة الجسيمات نفسها)، والحقول المطبقة خارجيًا. و تكون معظم التفاعلات الجسيمية الأساسية في الطابع الكهرومغناطيسي، باستثناء بعض حالات الاصطدام القريب.

التفاعلات في البلازما

يوجد نوعين من التفاعلات في البلازما:

شحنه مع شحنه، حيث في البلازما يحيط بالجسيم المشحون حقل كهربائي ويتفاعل مع الجسيمات المشحونة الأخرى وفقًا لقانون قوة كولوم، مع اعتماده عكسيا على مربع المسافة الفصله.

علاوة على ذلك **تفاعل الجسيمات المشحونة و المتعادله** من خلال حقول الاستقطاب الكهربائي الناتجة عن تشويه السحابة الإلكترونية للجسيم المتعادل أثناء مرور قريب من الجسيم المشحون. يتضمن الحقل المرتبط بالجزيئات المتعادله قوى قصيرة المدى، بحيث يكون تفاعلها فعالًا فقط للمسافات الفاصلة بين الذرية صغيرة بما يكفي لإزعاج الإلكترونات المدارية.

يكون ذلك ملحوظًا عندما تكون المسافة بين مراكز الجزيئات المتفاعلة في حدود قطرها، ولكن تقريبًا الصفر عندما تكون متباعدة. يمكن وصف خصائصه بشكل كاف فقط من خلال اعتبارات ميكانيكية الكم. في كثير من الحالات، يتضمن هذا التفاعل لحظات ثنائية القطب دائمة أو مستحثة.

يمكن التمييز بين البلازما المتأينة ضعيفًا والبلازما المتأينة بقوة من حيث طبيعة تفاعلات الجسيمات. في البلازما المتأينة ضعيفة، تهيمن التفاعلات المتعادله الشحنة على التفاعلات متعددة كولوم. عندما تكون درجة التأين لدرجة أن التفاعلات المتعددة كولوم تصبح مهيمنة، فإن البلازما تعتبر مؤينة بقوة. مع زيادة درجة التأين، تصبح تفاعلات كولوم ذات أهمية متزايدة بحيث تتعرض جميع الجسيمات في بلازما مؤينة بالكامل إلى تفاعلات كولوم متعددة.

بعض ظواهر البلازما الأساسية

إن حقيقة أن بعض أو كل الجسيمات الموجودة في البلازما مشحونة كهربائياً وبالتالي فهي قادرة على التفاعل مع الحقول الكهرومغناطيسية، وكذلك خلقها، تؤدي إلى ظهور العديد من الظواهر الجديدة غير الموجودة في السوائل والمواد الصلبة العادية. إن وجود المجال المغناطيسي المستخدم، على سبيل المثال، في تسخين وحبس البلازما في الأبحاث النووية الحرارية التي يتم التحكم فيها يبرز إلى حد كبير حداثة ظواهر البلازما. لاستكشاف جميع ميزات ظواهر البلازما، عادة ما تتم دراسة سلوك البلازما بحضور كل من المجالين الكهربائي

والمغناطيسي.

التوصيلية

بسبب تنقل الإلكترون العالي، فإن البلازما عادة ما تكون موصلات كهربائية جيدة جدًا، وكذلك الموصلات الحرارية الجيدة. نتيجة لاشتقاقها الكهربي العالي، فهي لا تدعم الحقول الإلكتروستاتيكية باستثناء، إلى حد ما، في الاتجاه الطبيعي لأي مجال مغناطيسي موجود، مما يمنع تدفق الجزيئات المشحونة في هذا الاتجاه.

الانتشار

يؤدي وجود تدرجات الكثافة في البلازما إلى انتشار الجزيئات من المناطق الكثيفة إلى المناطق ذات الكثافة المنخفضة. على الرغم من أن مشكلة الانتشار في البلازما غير الممغنطة تشبه إلى حد ما تلك التي تحدث في السوائل العادية، إلا أن هناك اختلافًا أساسيًا. بسبب انخفاض الكتلة، تميل الإلكترونات إلى الانتشار بشكل أسرع من الأيونات، مما يولد مجالًا كهربائيًا للاستقطاب نتيجة لفصل الشحنة. يعزز هذا الحقل من انتشار الأيونات ويقلل من انتشار الإلكترونات، بطريقة تجعل الأيونات والإلكترونات منتشرة بنفس المعدل تقريبًا. يسمى هذا النوع من الانتشار بالانتشار المحيطي. عندما يكون هناك مجال مغناطيسي مطبق خارجيًا، يتم تقليل انتشار الجزيئات المشحونة عبر خطوط الحقل، مما يشير إلى أن الحقول المغناطيسية القوية مفيدة في حبس

البلازما. يسمى نشر الجسيمات المشحونة عبر خطوط المجال المغناطيسي عندما يكون معامل الانتشار متناسبًا مع $1 / B^2$، حيث تشير B إلى حجم الحث المغنطيسي، ويسمى الانتشار الكلاسيكي، على عكس ما يسمى نشر Bohm الذي يكون فيه معامل الانتشار متناسبًا إلى $1 / B$.

الموجه

من الخصائص المهمة للبلازما قدرتها على الحفاظ على مجموعة كبيرة ومتنوعة من ظاهرة الموجة. ومن الأمثلة على ذلك موجات البلازما الإلكتروستاتيكية الطولية والموجات الكهرومغناطيسية العرضية عالية التردد. في النظام ذو التردد المنخفض، تكون الأوضاع الموجية المهمة في البلازما الممغنطة هي ما يسمى بموجات ألفين والأمواج المغنطيسية. يمكن وصف كل من الأساليب المختلفة لانتشار الموجات بعلاقة تشتت، وهي علاقة وظيفية بين تردد الموجة وعصا الموجة k واستقطابها. توفر دراسة الموجات في البلازما معلومات مهمة عن خصائص البلازما وهي مفيدة للغاية لتشخيص البلازما.

تخميد الموجه

العمليات التبادلية، مثل الاصطدامات، تنتج التخميد من سعة الموجة. وهذا يعني أن الطاقة يتم نقلها من مجال الموجة إلى جزيئات البلازما. توجد أيضًا آلية غير جماعية لتوهين الموجات في البلازما، والتي تعرف باسم التخميد

Landau. تتمثل الآلية المسؤولة عن تخميد Landau في حبس بعض جسيمات البلازما (تلك التي تتحرك بسرعات قريبة من سرعة طور الموجة) في بئر الطاقة المحتملة للموجة، والنتيجة الصافية هي نقل الطاقة من الموجة إلى حبيبات.

اتساع الموجه

من الممكن أيضًا أن يكون لديك أوضاع ذات اتساع متزايد، نتيجة لعدم الاستقرار، والتي تنقل الطاقة من جزيئات البلازما إلى مجال الموجة. تعد ظواهر عدم الاستقرار مهمة في مجموعة واسعة من المواقف المادية التي تنطوي على عمليات ديناميكية في البلازما. إن وجود العديد من أنواع عدم الاستقرار في البلازما يؤدي إلى تعقيد احتجاز البلازما الساخنة في المختبر إلى حد كبير. دراسة هذه الاضطرابات ذات أهمية أساسية لبحوث الاندماج النووي الحراري التي يتم التحكم فيها.

إنبعاث الاشعاع

جانب هام آخر لسلوك البلازما هو انبعاث الإشعاع. يكمن الاهتمام الرئيسي بإشعاع البلازما في حقيقة أنه يمكن استخدامه لاستنتاج خصائص البلازما. يمكن تصنيف الآليات التي تسبب إشعاعات البلازما أو امتصاصها في فئتين: الإشعاع المنبعث من الذرات أو الجزيئات المنبعثة، والإشعاع الناتج عن الشحنات المتسارعة. في نفس الوقت الذي يتم فيه إنتاج التأين في بلازما،

تحدث العملية المعاكسة، إعادة تركيب الأيونات والإلكترونات لتكوين جزيئات محايدة، عادةً. نتيجة لعملية إعادة التركيب، غالبًا ما ينبعث الإشعاع لأن الجزيئات المفعمة التي تتشكل أثناء إعادة التركيب تتحلل إلى الحالة الأرضية. هذا الإشعاع يشكل خط أطياف البلازما. من ناحية أخرى، أي الجسيمات المشحونة المعجلة تنبعث من الإشعاع. يطلق على الإشعاع المنبعث عندما يتم تباطؤ الجسيمات المشحونة عن طريق إجراء نوع من التفاعل التصادمي الفرملة. إذا بقيت الجسيمات المشحونة غير مرتبطة، قبل وبعد اللقاء على حد سواء، فإن العملية تسمى الفرملة المجانية. يمكن أن ينبعث أو يمتص الإشعاع من أي طول موجي في bremsstrahlung. إذا تم التقاط جسيم مشحون غير ملزم أصلاً بواسطة جسيم آخر، حيث ينبعث منه الإشعاع، فإن العملية تسمى الإشعاع الحر. يرجع الإشعاع السيكلوتروني، الذي يحدث في البلازما الممغنطة، إلى تسارع الجاذبية المغناطيسية للجسيمات المشحونة لأنها تتصاعد حول خطوط المجال المغناطيسي. إشعاع الجسم الأسود المنبعث من البلازما في توازن الديناميكا الحرارية مهم فقط في البلازما الفيزيائية الفلكية، بالنظر إلى الحجم الكبير اللازم للبلازما للإشعاع كجسم أسود.

الفصل الثاني

إنتاج البلازما و التفريغ الكهربائي

إنتاج البلازما

يمكن إنتاج البلازما عن طريق رفع درجة حرارة المادة حتى يتم الحصول على تأين عالي. تحت ظروف التوازن الحراري الديناميكي، ترتبط درجة الحرارة ارتباطا وثيقا بدرجة التأين للإلكترون.على الرغم من ان البلازما في حاله التوازن الديناميكي الحراري توجد في أماكن كثيرة في الطبيعة ، كما هو الحال بالنسبة للعديد من البلازما الفلكية ، فهي ليست شائعة جدا في المختبر.

البلازما يمكن أيضا أن تتولد عن عمليات التأين التي يتم فيها رفع درجة التأين أعلى بكثير من قيمة التوازن الحراري.هناك العديد من الطرق المختلفة لإنشاء البلازما في المختبر و اعتمادًا على الطريقة ، قد يكون للبلازما كثافة عالية أو منخفضة ، درجة حرارة مرتفعة أو منخفضة ، قد تكون ثابتة أو عابرة ، مستقرة أو غير مستقرة ، وهلم جرا .

في ما يلي ، يتم تقديم وصف موجز لأكثر العمليات حدوثا تعرف بالتفريغ

الكهربائي الفوتوني في الغازات.

حيث يحدث التأين عن طريق امتصاص الذره لفوتونات ذو طاقة مساوية أو أكبر من طاقه التأين للالكترون . الطاقة الزائدة للفوتون تتحول الي طاقة حركية للزوج الايوني (الإلكترون أيون الموجب) ، فمثلا، طاقة التأين المحتملة للإلكترون الخارجي لذره الأكسجين هو 13.6 فولت ، والتي يمكن توفيرها عن طريق إشعاع طوله الموجي أصغر من حوالي 91 نانومتر ، أي في مدي الأشعة فوق البنفسجية البعيدة.يمكن أن يحدث التأين أيضًا باستخدام الأشعة السينية أو أشعة جاما ، التي لها أطوال موجية أصغر بكثير. كما يحدث في الغلاف الجوي للأرض.

علي سبيل المثال، يتم تطبيق مجال كهربي عبر انوب تفريغ غازي يحوي غاز مؤين، مما يسرع الإلكترونات الحرة إلى طاقات عالية كافيه لتأين ذرات أخرى عن طريق التصادم. و ميزه هذه العملية هو أن يقوم المجال الكهربي المطبق بنقل الطاقة بكفاءة أكبر إلى الإلكترونات من الأيونات الثقيلة نسبيه. أيون نقل الطاقة الحرارية من الإلكترونات إلى الجزيئات الأثقل بطيء جدا و ذلك نظرا الي ان درجة حرارة الإلكترون في الانابيب التفريغ الغازي أعلى عادة من درجة حرارة.

عند إيقاف تشغيل مصدر التأين ، يتناقص التأين تدريجيا بسبب إعادة الارتباط حتى يصل إلى قيمة التوازن بما يتفق مع درجة الحرارة المتوسطة في

المختبر مما يحدث اعاده ارتباط بسرعة كبيرة بحيث تختفي البلازما بالكامل في جزء صغير من الثانية.

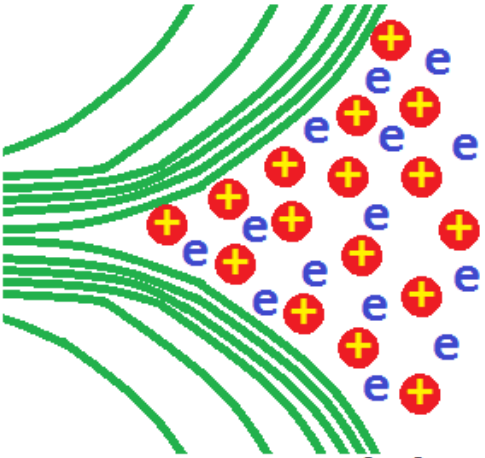
من الممكن مشاهدة البلازما كحالة تأين غازي يوميا في المصابيح الكهربائية المتفلورة والزئبقية أو الهالوجينية إلا أن البلازما في هذه الحالات تتعرض لعملية مستمرة وسريعة من خلال ارتطام الالكترونات والايونات بجدار المصباح البارد ولذلك فإننا إلا نحصل على تأين جزئي فقط للذرات في هذه المصابيح ولذلك فان المحافظة على نسبة معينة من التأين يحتاج دائما إلى ضخ كميات كبيرة نسبيا من القدرة الكهربائية إلى المصباح.

و لانتاج بلازما اكثر استقرارا و لفترات طويله تحتاج الي درجات حراره عاليه جدا. إن وجود البلازما في درجات حرارية عالية يضع قيودا على مسالة احتواء البلازما ،حيث لا يمكن احتواء البلازما مباشرة داخل وعاء مادي لان درجة حرارة البلازما العالية ستؤدي إلى صهر الوعاء ،ولكن يمكن مبدئيا على الأقل المحافظة على البلازما ضمن مجالات مغناطيسية بحيث لا يسمح أن تلامس الجدران المادية للوعاء .إن موضوع احتواء البلازما من أكثر المواضيع التي تجرى عليها بحوث موسعة بغية الوصول إلى تحقيق الشروط المناسبة لتحقيق تفاعل الاندماج النووي في البلازما الساخنة وبدون توفر هذا الاحتواء لا يمكن للبلازما البقاء فترة تزيد على جزء من المليون من الثانية.

البلازما الصناعية

تنتج معظم البلازما الصناعية بتطبيق (تسليط) مجالات كهربائية أو مغناطيسية أو كليهما. ويمكن تصنيف البلازما المنتجة معمليا وتلك المعدة للإستخدام الصناعي عادة بحسب:

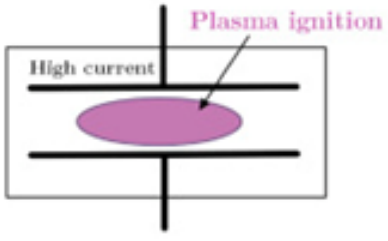
- نوع مصدر الطاقة المنتجة لتلك البلازما: التيار الكهربائي، التردد الموجي، والتردد ذي الموجات الدقيقة.
- مجال الضغط لديها: ضغط الفراغ (< 10 Torr) (ميلليمتر زئبق) ، ضغط معتدل (~ 1Torr).
- درجة التأين بالبلازما: تأين كامل، تأين نسبي، تأين ضعيف.
- درجة الحرارة داخل البلازما: بلازما حرارية ($T_{gas} = T_e = T_{ion}$)، بلازما غير حرارية أو باردة ($T_{gas} = T_{ion} << T_e$).
- شكل القطب المستخدم لتوليد البلازما.
- مغناطيسية الجسيمات الداخلة بالبلازما: ممغنطة (الأيون والإلكترون كليهما محاصران في مدار لارمر بواسطة المجال المغناطيسي)، ممغنطة جزئيا (الإلكترونات وحدها محاصرة بواسطة المجال المغناطيسي)، غير ممغنطة (المجال المغناطيسي ضعيف وغير قادر على الإمساك بالجزيئات حول المدارات).
- الاستعمال والتطبيق.



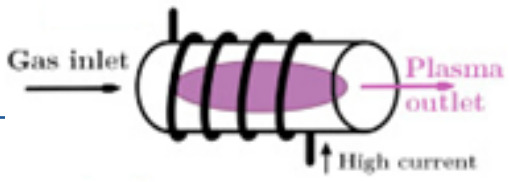
أمثلة على البلازما الصناعية

التفريغ بالضغط المنخفض:

- **بلازما التفريغ المتوهج:** بلازما غير حرارية تتولد بتطبيق تيار كهربائي مستمر أو تردد منخفض لموجات المجال الكهربائي للفراغ ما بين قطبين معدنيين (أقل من 100kHz). وأشهر تطبيق لذلك هو إضاءة مصابيح الفلوريسنت.
- **بلازما التقارن بالسعة:** شبيهة لما قبلها، لكنها تحتاج إلى مجال كهربائي ذو تردد موجات عالي (حوالي 13.56MHz). وهذه تختلف عن التفريغ المتوهج، ذلك أن الأغلفة (صفيحة البلازما) أقل كثافة بكثير. وتستخدم بشكل شائع في الصناعات الدقيقة وصناعة الدوائر المتكاملة لعمل النقش البلازمي (الحفر بالبلازما) والترسيب الكيميائي للبخار المدعم بالبلازما.
- **بلازما التقارن بالحث:** مشابهة للتقارن بالسعة ومشابهة ايضا من حيث التطبيقات، ولكن قطبها يحتوي على ملف يغطي منطقة التفريغ مما يثير البلازما بالحث.

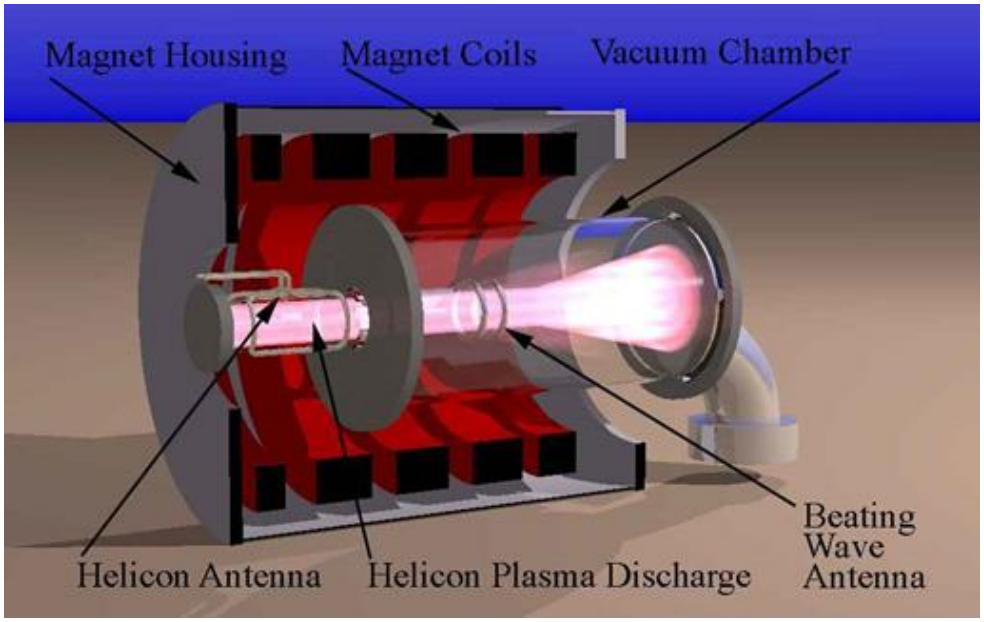


بلازما التقارن بالسعة



بلازما التقارن بالحث

• **بلازما الموجات المسخنة:** مشابهة للتقارن بالحث والسعة من حيث الترددات، ولكن الموجات تسخن بواسطة كلا الوسيلتين: الكهروستاتيكية والكهرومغناطيسية. وهي تحتاج إلى مجال مغناطيسي متحد المحور لنشر الموجات.



التفريغ بالضغط الجوي

• **التقوس الكهربائي:** وهو ما يسمى باللحام، وهي طاقة لتصريف درجات حرارة عالية (~10000K)، تتولد من عدة مصادر طاقة، وتستخدم بشكل عام بعمليات التعدين. فعلى سبيل المثال، تستخدم لصهرالصخور المحتوية على

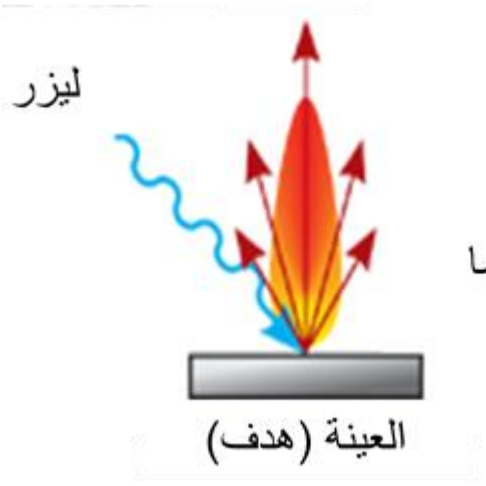
أوكسيد ألالومنيوم لإنتاج معدن الألمونيوم.

• **التفريغ الإكليلي:** تفريغ لا حراري يولد بواسطة تطبيق جهد كهربائي عالي على الأطراف الحادة للقطب. ويستخدم بشكل عام لتوليد غاز الأوزون ومرسبات الجسيم.

• **تفريغ حاجز العازل الكهربائي:** تفريغ لا حراري يولد بتطبيق جهد كهربائي عالي خلال فجوات، بحيث يمنع العازل غير الموصل إنتقال تفريغ البلازما إلى تقوس. وفي العادة يتم الخلط بين هذا التفريغ والتفريغ الإكليلي بالصناعة، مع أنهما متشابهين بالتطبيقات. يستخدم بنطاق واسع لعمل تشابك الأنسجة الصناعية واللدائن.

بلازما الإشعاع

يعتبر من أكثر التقنيات شيوعا لتوليد البلازما وذلك بإستخدام أشعة الالكترونات وأشعة الليزر، إذ يتم تعزيز بلازما التفريغ الإشعاعى عن طريق تفاعل شعاع الإلكترون مع وسيط غازي، والتأثير الجمعى لذلك ينتج ذبذبات بلازمية مضطربة ذات سعة عالية، وتسخين إلكترون البلازما فى المجال المضطرب يكفى لاستمرار بلازما التفريغ الإشعاعى، فانتقال الطاقة فعال جدا لتوليد البلازما بنسبة 70% من طاقة الإشعاع، حيث من الممكن إنتاج البلازما بدرجات عالية من التأين فى بيئة ضغط منخفض. ويمكن التحكم بخواص البلازما عن طريق تيار شعاع الإلكترون، وضغط



الغاز، وشكل الشعاع. والبلازما المنتجة بشعاع الإلكترون تستخدم فى معالجة كثير من المواد، كما أن البلازما المنتجة بنبضة الليزر ذات قدرة هائلة فى التعامل مع المواد الصلبة فى التحزيز وإزالة الشوائب والتشكيل واللحام عند درجات حرارة عالية.

العمليات الأساسية في التفريغ الكهربائي للغاز

- عند إمرار تيار ذا قيمة مناسبة خلال الغاز يؤدي إلى إنتاج أيونات والكترونات حرة تتعجل بواسطة المجال الكهربائي المسلط بين القطبين فتحصل على طاقة حركية إضافية تمكنها من إثارة ذرات أخرى متعادلة عن طريق التصادم.
- تكون حركة الإلكترونات أكثر اهمية من حركة الأيونات في عملية الإثارة عن طريق التصادم بسبب كتلتها الأصغر.
- معدل الطاقة الحركية للإلكترونات أكبر بكثير من معدل الطاقة الحركية للأيونات في حالة الضغوط المنخفضة للغاز.
- الإلكترونات والأيونات تأخذ الطاقة من المجال الكهربائي المسلط وتنقلها عبر التصادمات مع الجسيمات الاخرى،
- إنتقال الطاقة في التصادم بين الأيونات والذرات يكون كبيراً جداً بسبب كون الكتلة متقاربة في كليهما. أما الالكترونات فأنها تقوم بنقل الطاقة فيما بينهما بشكل فعال عبر التصادمات التي تتم بعيداً عن منطقة الكاثود.

- الإلكترونات تأخذ طاقة اكبر من المجال الكهربائي مما تأخذه الأيونات بسبب كتلتها الاصغر وسرعتها الإنجرافية الأكبر.
- يحدث تبادل الطاقة بين جسيمات الغاز بشكل رئيسي عن طريق التصادمات التي تصنف الى عدة انواع مختلفة. أحد انواع هذه التصادمات هو التصادم المرن (Elastic Collision) والذي يتم فيه تبادل الطاقة الحركية فقط، وان اغلب التصادمات في الغازات تكون من النوع المرن بسبب أن التركيب الذري أو الجزيئي للغاز لا يتغير. أما التصادم غير المرن (Inelastic Collision) فإنه يتضمن تبادل طاقة التهيج أو طاقة التأين (أو طاقة التفكك في الغازات الجزيئية) إضافة إلى الطاقة الحركية. لذا فان الالكترون الذي يصطدم بذرة متعادلة يمكن ان يثير تلك الذرة وبالتالي يزيد من الطاقة الكامنة فيها على حساب نقصان الطاقة الحركية للإلكترون.

أنسياب الالكترونات في الانابيب المفرغة

1. التفريغ الغازي التابع

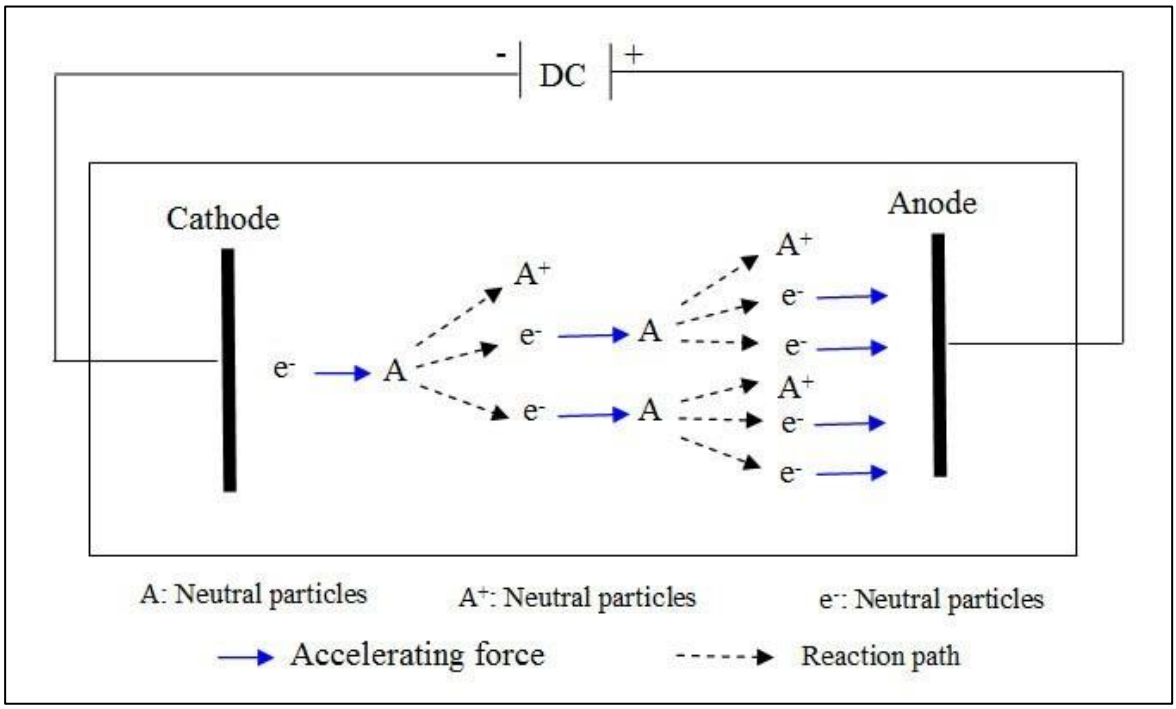
يسمى مرور التيار الكهربائي في الغاز بالتفريغ التابع إذا كان التوصيل الكهربائي فيه ناتجاً عن مؤينات خارجية.

عند القيم الصغيرة للجهد تعطى كثافة التيار J بدلالة المجال E بالعلاقة:

$$\vec{J} = en_0\,(u_i + u_e)\vec{E}$$

كل من u_e وu_i تتناسب عكسياً مع ضغط الغاز الذي يتراوح بين Torr (10^{-4} و 10^{2}) . وباستمرار وجود المجال الكهربائي ينخفض تركيز الايونات في الغاز المفرغ

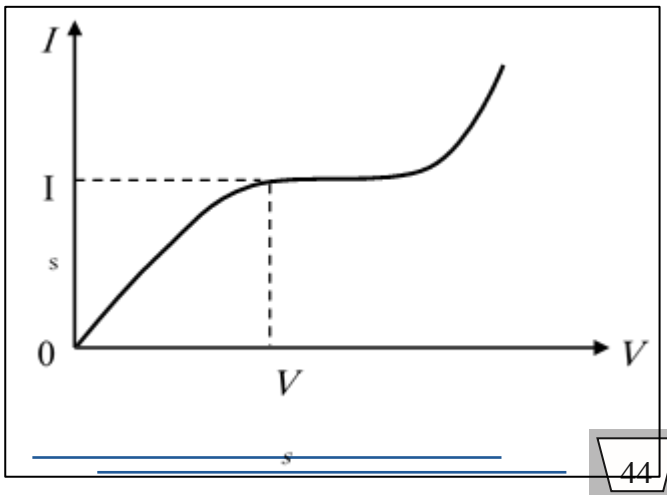
وتختل العلاقة بين التيار والجهد المطبق بين القطبين.



إن اقصى قيمة ممكنة لشدة التيار I_s عند كل شدة تاين معينة يسمى تيار الاشباع، وهذه في الحالة التي تصل فيها جميع الأيونات المتولدة من الغازالى الأقطاب.

2. التفريغ الغازي الذاتي

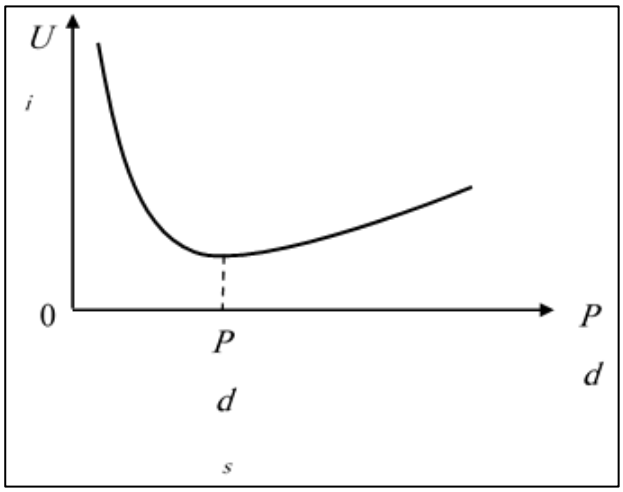
وهوالتفريغ الكهربائي في الغاز والذي يستمر بعد إبطال تأثير المؤين الخارجي. وتتولد الشحنات الكهربائية الحرة اللازمة لإستمرار مثل هذا التفريغ بشكل أساسي نتيجة للتأين التصادمي لجزيئات الغاز بفعل



الإلكترونات (التأين الحجمي) وبسبب إخراج الإلكترونات من الكاثود عند إصطدام الأيونات الموجبة به (التأين السطحي). أما التاين التصادمي لجزيئات الغاز بواسطة الأيونات الموجبة فلا يلزم أخذه في عين الاعتبار الا في حالات المجالات القوية. وقد يحدث إنبعاث الإلكترونات من الكاثود كذلك نتيجة لتسخينه (الإنبعاث الالكتروني الحراري). أو بسبب توهج الغاز المفرغ (الإنبعاث الإلكتروني الضوئي).

تحول التفريغ الغازي من التفريغ التابع إلى تفريغ ذاتي يدعى بالإنهيار الكهربائي للغاز وهو يحدث عند جهد الاشتعال U_i (جهد الإنهيار) ويعطى شرط إشتعال التفريغ الذاتي بين قطبين مستويين طبقا لنظرية تاونسند التقريبية:

$$\gamma\left(e^{\alpha d}-1\right)=1$$



حيث d المسافة او البعد بين القطبين و α معامل التأين الحجمي للغاز بالإلكترونات وهو يساوي متوسط عدد التأينات التي يحدثها الإلكترون الواحد أثناء قطعه مسافة قدرها وحدة طول و γ معامل التأين السطحي وهو يساوي متوسط عدد الإلكترونات المنبعثة من الكاثود بفعل أيون موجب واحد. إن جهد الاشتعال يعتمد على حاصل ضرب ضغط الغاز P والمسافة بين القطبين d

(وفق قانون باشين الذي ينص على تناسب جهدالإنهيار، للتفريغ الشراري بين قطبين في غاز، تناسباً طردياً مع حاصل ضرب ضغط الغاز في المسافة بين القطبين). وكما موضح بالشكل:

ومع انخفاض جهد التأين واستمرار عمل الكترونات الكاثود تنخفض قيمة جهد الاشتعال وتسمى العلاقة بين تيار التفريغ وبين الجهد المطبق على الاقطاب بمنحنى I-V للتفريغ.

الضغوط المنخفضة

إذا كان ضغط الغاز لا يتجاوز بضعة ملمترات زئبق فمن المحتمل جداً ان يتكون التفريغ التوهجي عند حدوث الإنهيار للغاز. تكون قيمة تيار التفريغ الكهربائي المار بحدود بضعة ملي أمبير عند تسليط فرق جهد قريب من فولتية إنهيار الغاز. ونحصل على التفريغ الذاتي المتوهج والذي يتضمن المناطق التالية اعتماداً على قيمة التيار الكهربائي المار عبر حيز التفريغ.

المنطقة الاولى (منطقة التفريغ المظلم)

تكون هذه المنطقة بمدى الفولتية المنخفضة إذ يكون التيار الناشئ بهذه الحالة قليلاً بسبب وجود عدد قليل من الجسيمات المتأينة التي تسهم في نشوء التيار، وعند زيادة الفولتية فان الجسيمات المشحونة تكتسب طاقة كافية لإنتاج جسيمات إضافية المشحونة من خلال التصادم المتأين وهذا يؤدي إلى زيادة خطية لتيار التفريغ.

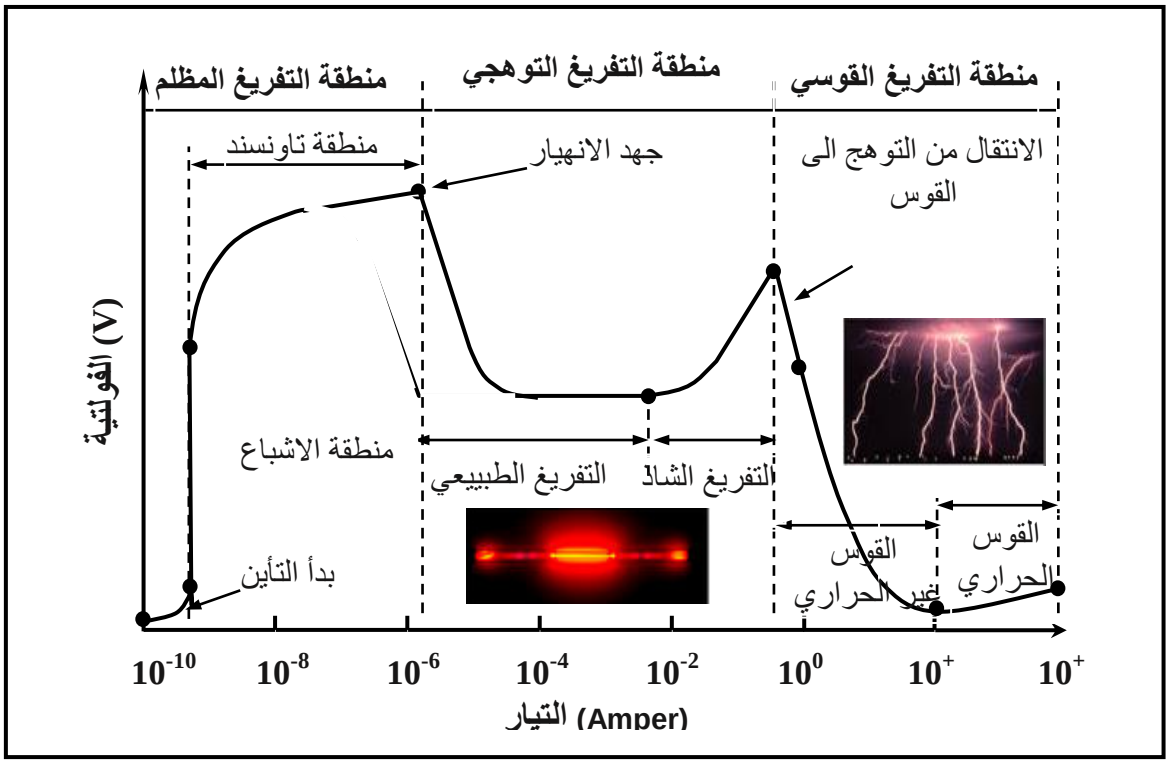
إنّ مقدار الفولتية يبقى ثابتاً محدداً بالممانعة الخارجية، وتدعى هذه المنطقة ايضاً منطقة التفريغ المظلم أو تفريغ تاونسند (Townsend) حيث تكون قيمة تيار التفريغ بحدود او اقل من 10^{-6} امبير.

المنطقة الثانية (منطقة التفريغ التوهجي)

عند زيادة اكثر للفولتية تحدث عملية إنهيار ناشئة من القصف الأيوني للقطب السالب محررة عدداً من الالألكترونات الثانوية ويسهم في هذه العملية ايضا القصف بالألكترونات، والفوتونات، والذرات المتعادلة، ولكل واحدة منها تختلف عن الأخرى بالطاقة، ونتيجة لتعجيل الالألكترونات الثانوية بمجال القطب السالب وتصادمها مع ذرات الغاز المتبقي مسببة إنتاج أيونات جديدة، وتتعجل الأيونات ثانية نحو القطب السالب لإنتاج الالألكترونات الثانوية الجديدة، وتستمر هذه العملية حتى نصل لمرحلة تكون فيها عملية التفريغ ذاتية الدعم ففي هذه الحالة يبدا الغاز بالتوهج عندها يحصل هبوط بالفولتية، وصعود فجائي للتيار وتدعى هذه المنطقة منطقة التفريغ التوهُّجي الطبيعي بثبوت الفولتية فان التيار يكون دالة لضغط الغاز. بعد هذه المنطقة عند زيادة الفولتية فَيُلاحظ توزيع منتظم لكثافة التيار، إذ تصبح كثافة التيار دالة للفولتية عند ثبوت الضغط، وتسمى هذه المنطقة بمنطقة التفريغ المتوهُّج غير الطبيعي. وتكون قيمة تيار التفريغ هنا بحدود 10^{-1} - 10^{-6} امبير.

المنطقة الثالثة (منطقة التفريغ القوسي)

وتحدث هذه المنطقة مباشرة بعد التفريغ التوهُّجي غير الطبيعي وتتصف بزيادة كبيرة للتيار مع هبوط مفاجئ للفولتية. و تكون قيمة تيار التفريغ هنا بحدود 10^{-1} امبير او اكثر.

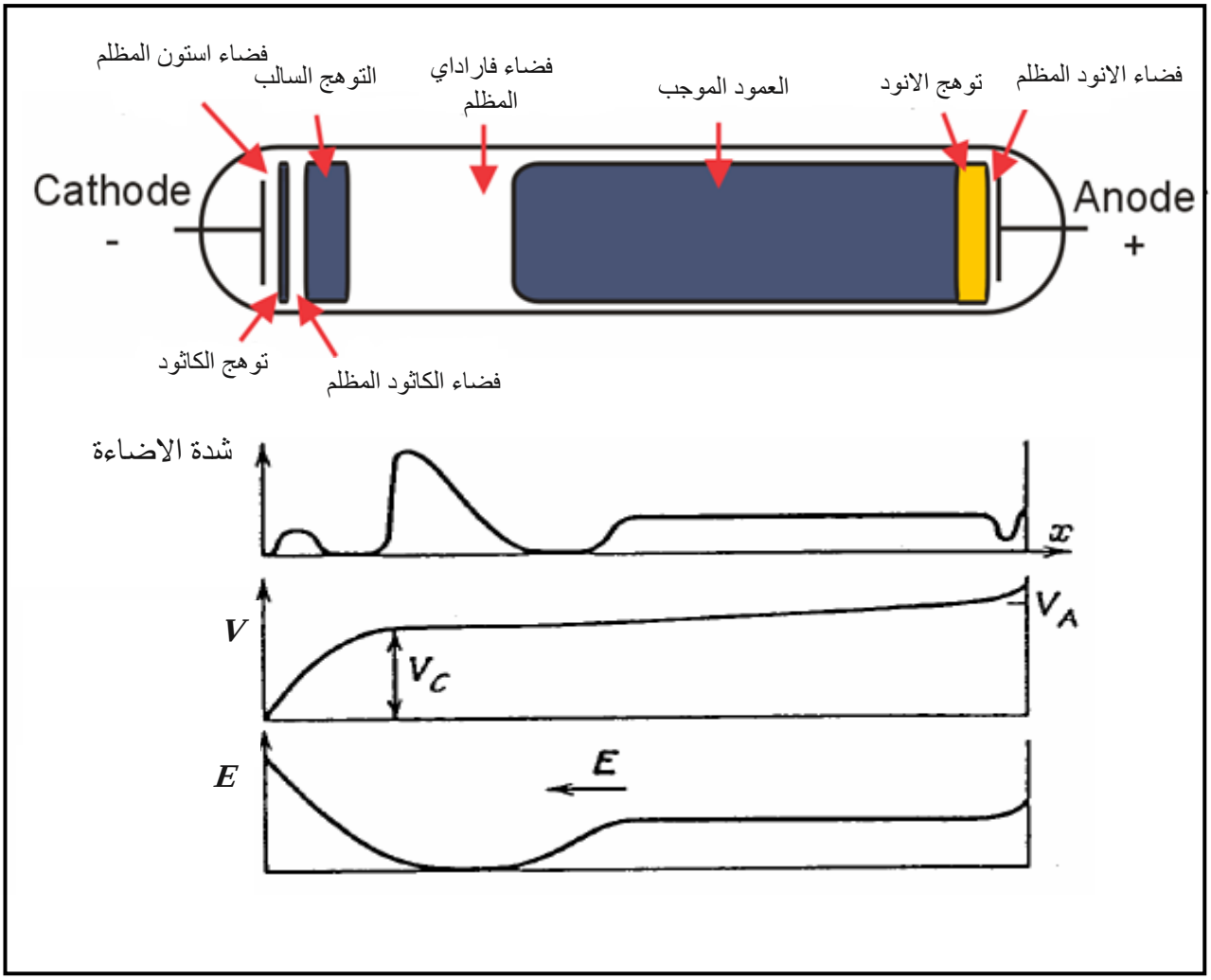


ميكانيكية توليد البلازما التفريغ التوهجي

يوصف التفريغ الكهربائي التوهجي بأنه التفريغ الذي تنبعث فيه الالكترونات من الكاثود بتأثير تصادم الدقائق والكمات الضوئية. يسمى بالتفريغ التوهجي للتوهج الذي يحدث قرب الكاثود وتفصله عنه فسحة مظلمة عندما يتولد التفريغ بتيار مستمر في انبوب مملوء بغاز معين تحت ضغط اقل من الضغط الجوي ونجد الضوء المرئي المنبعث من التفريغ يملأ الانبوب كله بانتظام، وموزع بمناطق محددة.

مناطق التفريغ التوهجي

تبدأ من الكاثود في بعض الاحيان فسحة مظلمة ضيقة (منطقة Aston) قرب الكاثود تتبعها طبقة ضيقة خافتة الاضاءة (التوهج الكاثودي) يتبعه فضاء مظلم (فضاء الكاثود المظلم) وبعدها نجد التوهج السالب ويقل التوهج كلما اقتربنا من منطقة فراداي المظلمة يأتي بعدها العمود الموجب وفي بعض الاحيان نلاحظ منطقة مظلمة ثم تليها منطقة مضيئة قرب الانود ومن المعروف ان هناك توزيع مختلف لمناطق التفريغ التوهجي تختلف باختلاف كلا من (الغاز و الضغط و ابعاد الانبوب الذي يحوي الغاز و مادة الاقطاب وحجمها ونوعها والبعد بينهما) فيتم تقليل التيار بالتفريغ التوهجي بواسطة الالكترونات والايونات الموجبة.



1.منطقة الكاثود: عند اصطدام ايون موجب بالكاثود ينبعث الكترون، هذا الالكترون يتعجل أول الأمر في مجال قوي ويلاقي عدة اصطدامات مهيجة لأن طاقته أقل من جهد التأين.

2.فضاء استون المظلم: وهي منطقة رقيقة تتكون بعد الكاثود ويكون المجال الكهربائي فيها قوي ويحدث هنا تسارع للالكترونات مبتعدة عن الكاثود. هنا

عدد الالكترونات اكبر بكثير من الايونات (تتكون هنا شحنة فراغ سالبة) لكن طاقتها غير كافي لاثارة (تهيج) الغاز لذا تبدو المنطقة مظلمة.

3. توهج الكاثود: هنا يبدأ المجال يضعف ونجد ان الالكترونات تؤين الغاز بكفاءة اكبر كون طاقتها تزداد بالتصادمات ويحدث تضاعف كبير في عددها.

4. فضاء الكاثود المظلم: منطقة يكون فيها المجال الكهربائي معتدل الشدة وتتكون هنا شحنة فراغ موجبة، حيث يصبح عدد الايونات كبير.

5. التوهج السالب: هنا يصبح المجال ضعيفاً جداً. عند حدود التوهج السالب عدد الالكترونات البطيئة يكون كبيراً جداً ويقل انطلاقها مع الابتعاد عن الكاثود. الالكترونات التي تدخل التوهج السالب تتكون من مجموعتين، مجموعة الالكترونات التي تكونت عند الكاثود أو قريبا منه والتي تكونت سريعاً لعدم اصطدامها في المنطقة المظلمة، والمجموعة الاكبر من الالكترونات التي تكونت في المنطقة المظلمة ولاقت عدة تصادمات غير مرنة، وتكون هذه مجموعة بطيئة، وعلى الرغم من ان طاقتها هي دون ذروة التأين ولكنها اكبر أو عند ذروة التهيج، لذا سوف تلاقي عدة اصطدامات تؤدي الى التهيج مكونة التوهج السالب.

6. فضاء فاراداي المظلم: هنا تركيز الالكترونات والايونات يكون عالٍ والمجال ضعيفا وتصبح طاقة الالكترونات ضئيلة الى الحد الذي قد يؤدي الى حدوث اعادة اتحاد مع الايونات الموجبة. انبعاث الضوء من عملية اعادة الاتحاد ضئيل جداً ومع الابتعاد قليلاً يوجد عدد اقل من الالكترونات السريعة

والضوء المنبعث يكون اقل والمجال يرتفع ببطء وتقل احتمالية اعادة الاتحاد وبذلك تتكون طبقة فراداي المظلمة.

7. العمود الموجب: وجد ان المجال الكهربائي هنا ثابت في اية نقطة. أي ان صافي شحنة الفضاء يساوي صفراً وبالتالي فان تركيز الالكترونات يساوي تركيز الايونات الموجبة لذلك اكثر قياسات تشخيص البلازما وتفاعلاتها تجرى من هذه المنطقة وبسبب كون تحركيه الايونات الموجبة اقل بكثير من تحركيه الالكترونات لذا نجد ان الالكترونات تحمل كل تيار التفريغ بينما تقوم الايونات الموجبة بتعادل شحنة الفضاء الالكترونية ويسمى بالعمود الموجب لأنه يوصل المناطق السالبة الى الانود ويكون العمود الموجب (اطول جزء في انبوب التفريغ) وعادة يكون العمود الموجب منتظماً وهذا الانتظام يشير الى ان التأين لا يحدث من تأثير انحراف الالكترونات باتجاه المجال ولكن يحدث من تأثير السرع العشوائية الكبيرة التي يتم الحصول عليها من التصادمات المرنة الهائلة في المجال.

8. توهج الانود: ان الالكترون الذي يجتاز العمود الموجب وبسرعة ابتدائية قليلة بتسارع باتجاه الانود قد يكتسب طاقة كافية لتهيج وتأين الغاز عند الانود، وعندئذ يتغطى الانود بطبقة مضيئة من التوهج (التوهج الانودي) التي تكون في بعض الاحيان مقسمة الى عدة بقع مضيئة.

9. الانود المظلم: عند الطرف الآخر من العمود الموجب قرب الانود نجد ان

الالكترونات تنجذب قرب الانود بينما الايونات الموجبة تتنافر منه وتبعا لذلك تتكون شحنة فضاء سالبة قرب الانود، وهذا يؤدي الى زيادة في المجال الكهربائي وكذلك ارتفاع في الجهد.

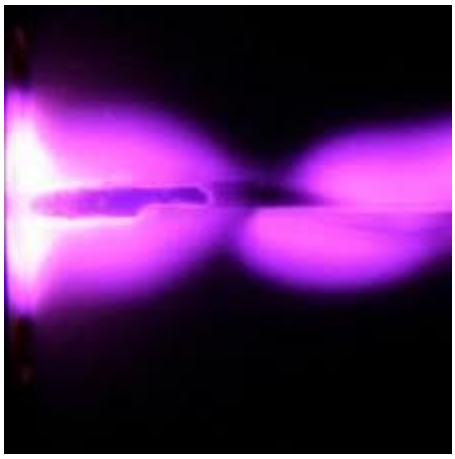
الضغوط العالية

إذا كان الضغط كبيراً (قريباً من الضغط الجوي) وكانت مقاومة الدائرة الخارجية منخفضة فيمكن أن يتكون التفريغ القوسي عند إنهيار الغاز، حيث أن التيار يتحدد أساساً بالدائرة الخارجية، وأن فولتية التفريغ تكون منخفضة (تعادل بضع عشرات من الفولتات). كما يمكن الحصول على التفريغ التوهجي عند الضغط الجوي أو أعلى منه بتيار تفريغ أكبر من واحد امبير الا أن التفريغ التوهجي يتحول إلى منطقة القوس الكهربائي إذا أزداد أي من الضغط أو التيار. عند الضغوط العالية تظهر أنماط عدة من التفريغ الغازي، هي التفريغ الهالي و التفريغ على شكل فرشاة والتفريغ الشراري والتفريغ القوسي.

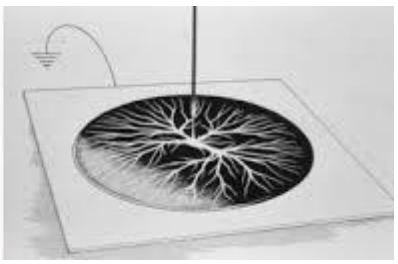
1. **التفريغ الهالي**: يظهر هذا التفريغ في الغاز اذا كان الغاز واقعا في مجال غير متجانس بصورة حادة، اي انه يظهر حول الاقطاب التي لها انصاف اقطار انحناء صغيرة مثل الاطراف المدببة واسلاك خطوط الضغط العالي.

في حالة التفريغ الهالي يحدث تأين الغاز وتوهجه في منطقة صغيرة نسبياً، هي تلك التي تحيط بالقطب ذي نصف قطر الانحناء الصغير. وتسمى المنطقة بالطبقة الهالية كما يسمى القطب نفسه بالقطب الهالي. اما الجزء الباقي من الفاصل التفريغي الواقع خارج الطبقة الهالية (او الطبقتين اذا كان كل من

القطبين محاطاً بهالة) فيعرف بالمنطقة الخارجية المعتمة للتفريغ الهالي. في حالة ظهور الهالة عند الكاثود (الهالة السالبة) تنبعث الالكترونات المسببة للتاين الحجمي من الكاثود بواسطة الايونات الموجبة. واذا كانت الهالة عند الانود (هالة موجبة) فان الالكترونات تظهر قرب الانود نتيجة لتاين الغاز ضوئياً بتأثير اشعاع الهالة. وفي منطقة التفريغ الخارجية يكون التوصيل الكهربائي للغاز ضئيلاً نسبياً، حيث يتم فقط على حساب جسيمات مشحونة ذات اشارة واحدة، ترد اليها من منطقة الهالة. ولذا فان شدة التيار في التفريغ الهالي لاتتحدد وفقاً لمقاومة الجزء الخارجي من الدائرة بل وفقاً لمقاومة منطقة التفريغ الخارجية.



2. **التفريغ على شكل الفرشاة:** في حالة الجهود العالية يتخذ التفريغ الهالي شكل الفرشاة المضيئة اي مجموعة من متحركة من الخطوط الدقيقة والمضيئة الملتوية، تخرج من الطرف المدبب ويسمى مثل هذا التفريغ بالتفريغ على شكل الفرشاة.



3. **التفريغ الشراري:** ويتخذ صورة خيوط متوهجة متفرعة، ذات اشكال متعرجة ومتقطعة. وهذه هي قنوات الغاز المتاين التي تتغلغل في فاصل التفريغ ثم تختفي ليظهر غيرها. وتتولد في حالة التفريغ الشراري كميات كبيرة من الحرارة فضلاً عن وهجه الساطع. وترجع الظاهر المميزة لمثل هذا التفريغ الى الانهيارات الالكترونية والايونية التي تظهر في القنوات الشرارية حيث يرتفع الضغط الى مئات اضعاف الضغط الجوي ودرجة الحرارة الى 10^4 ^oC. ويمثل البرق نموذجا للتفريغ الشراري ويتراوح قطر القناة الرئيسية للبرق بين (10, 25) cm بينما يصل طولها الى عدة كيلومترات كما تبلغ اقص شدة تيار لنبضة البرق مئات الالاف من الامبيرات.

4. **التفريغ القوسي:** ويحدث بكثافة تيار عالية بينما يكون فرق الجهد للاقطاب عدة عشرات من الفولتات. وينتج التفريغ القوسي عن انبعاث كثيف للاكترونات الحرارية من كاثود محمي. وتتعجل الالكترونات بواسطة المجال الكهربائي وتؤين جزئياً الغاز تصادمياً. لذلك لاتكون المقاومة الكهربائية للفاصل الغازي بين اقطاب القوس كبيرة. وعند زيادة شدة تيار القوس تزداد ناقلية الفاصل الغازي بدرجة تؤدي ال انخفاض فرق الجهد بين الفطبين. تصل درجة حرارة الكاثود عند الضغط العادي الى $3000^{o}C$.

ان الطريقة المتبعة لتوليد البلازما في المختبرات البحثية بحاجة في البدء إلى ادخال الغاز بمنظومات بحثية تحت ضغط يعادل جزءاً من مقدار الضغط الجوي، ويسخن الغاز بطريقة معينة حتى تصبح طاقتها الحركية مساوية لطاقة التاين لذرة الغاز أو اكبر من هذه الطاقة إذ تؤدي عمليات التصادم غير المرنة بين ذرات الغاز إلى إحداث تأينات متتالية بهذه الذرات، ولما كانت طاقة التاين

للذرات هي بحدود بضع وحدات الكترون فولت، فيمكن إحداث التأين عندما تكون درجة الحرارة كافية لكسب ذرات الغاز طاقة مساوية لجهد تاينها.

منظومة البلازما

تتكون منظومة بلازما التفريغ الكهربائي في معظم الحالات كالاتي:

حجرة الفراغ

وتكون من الفلاذ المقاوم للصدأ على هيئة تقاطع، تمتاز بتعدد الاستخدامات لوجود الفلنجة الخدمية التي تحوي فتحات مرور الى داخل الحجرة، يتم عن طريقها ادخال وتثبيت مجسات التشخيص الكهربائية الى داخل الحجرة والسيطرة على تحريكها مع بقاء الفراغ مغلق. وكما مبين في الشكل.

وعلى جانبي الحجرة توجد نافذتان زجاجيتان من زجاج البايركس يتم من خلالهما سقوط ونفوذ الشعاع الكهرومغناطيسي. ويتم استخدام حلقات نحاسية ومطاطية لعزل الفراغ أثناء غلق نوافذ الحجرة. كذلك يتم عزل الحجرة من الداخل بمادة لاصقة عازلة لمنع حدوث الشرارات الكهربائية (Spark) والتي تؤثر على استقرارية التفريغ الكهربائي.

منظومة التفريغ ومقاييس الضغط

تتكون منظومة التفريغ من مضخة ميكانيكية دوارة ومضخة الزيت الانتشارية وتعمل على تفريغ الحجرة الى ضغط أقل من (10^{-6} mbar) بواسطة صمام

التفريغ العالي والفترة الزمنية التي سيتغرقها الزيت للوصول الى درجة التبخر هي بين min (16- 18)، ويتم تبريد زيت المضخة الانتشارية عن طريق الماء المبرد بواسطة جهاز تبريد حيث تصل درجة حرارة الماء فيه الى حدود ^{o}C (10 – 11)، ويتم قياس حدود ضغط المضخة الدوارة و المضخة الانتشارية بواسطة عداد رقمي لقراءة الضغط ودرجة الفراغ داخل الحجرة.

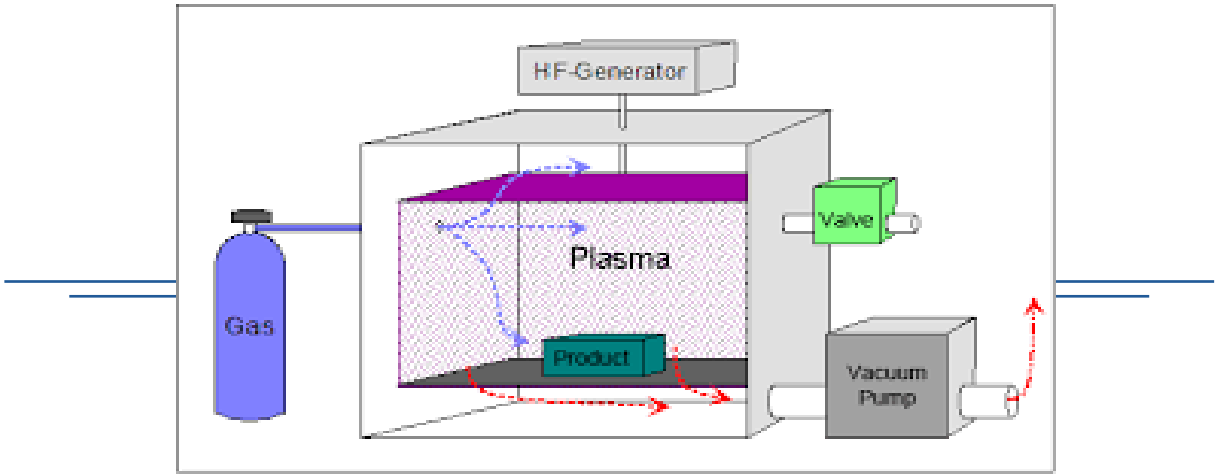
ويتم توصيل منظومة التفريغ بحجرة الفراغ وملحقاتها من خلال انابيب توصيل مرنة ومحكمة.

وحدة تجهيز الغاز

عادة يتم استخدم غاز الاركون العالي النقاوة (99.9%) من خلال قنينة الغاز المحتوية على مقياس تنظيم كمية دخول الغاز والتحكم بضغطه الجزئي بواسطة صمام ابري دقيق.

أقطاب التفريغ الكهربائي

يتم تصميم وتصنيع اقطاب التفريغ الكهربائي من مادة الكرافيت الدهني ذي المواصفات العالية من حيث دالة الشغل القليلة جداً والقليل التأكسد والانبعاثية الحرارية التي تسبب التلوث وتعيق التفريغ الكهربائي بتكوين الشرارة الكهربائية (Spark).



حج
منظوم
مج

الفصل الثالث

تطبيقات البلازما

مقدمة

شكل البلازما أساسا قويا لمجموعة من تطبيقات وأدوات التقنية المهمة بالإضافة إلى فهمنا وادراكنا لمعظم الكون من حولنا، فهي تزود الاساس والدعامة للتطبيقات الحالية مثل معالجة بلازما أشباه الموصلات وتعقيم بعض المنتجات الطبية والمصابيح والليزر والمايكرويف الكهربائي عالي المصدر وكذلك التطبيقات المحتملة المهمة مثل جيل الطاقة الكهربائية من

الانشطار والسيطرة على التلوث وإزالة المواد الكيميائية الخطرة.

علم البلازما يستثمر تشكيلة متنوعة من مجالات العلم تتراوح من فيزياء البلازما إلى التطبيقات الكيميائية، الفيزياء الذرية والجزيئية، وعلم المادة. انتشارها وطبيعة تنوع حقول الدراسة تميّز طبيعة تكون البلازما، التي تتضمن الغازات المؤينة التي تتراوح من مؤين ضعيف الى المؤين إلى حد كبير، ومن الاصطدامية إلى الثبات، ومن البرودة إلى الحرارة. هذه الشروط تميز تراوح البلازما المختلف من الغازات عالية الضغط نسبيا مع جزء صغير من الذرات المؤينة ومستوى قليل نسبيا من الجزئيات المشحونة بدرجات حرارة، على سبيل المثال، البلازما الستعملة في معالجة رقائق الحاسوب والاضاءة، إلى تلك الغازات ذات الكثافة المنخفضة جدا مع جزء كبير من ذرات الغاز المتأين والمشحونة بدرجة حرارة عالية جدا، على سبيل المثال، بلازما الإنشطار. الأنواع المختلفة للبلازما تشكل اساس التطبيقات المتنوعة والظواهر الطبيعية المختلفة. على كل حال، العديد من الاعتبارات الاساسية لتنوع المجالات الواسعة التي تميز العديد من البلازما سواء الطبيعية منها او الصناعية والتي هي مهمة في حياتنا.

إن التنوع الذي يتضمن "علم بلازما" يجعل الموضوع صعب التمييز. على أية حال، هو ذلك التنوع نفسه الذي يجعله المساهم المهم في تشكيلة واسعة من التطبيقات والتطور التكنولوجي. تحت قائمة العديد من التطبيقات

التقنية للبلازما.

بعض التطبيقات التجارية والصناعية للبلازما

معالجة الإشعاع مثل:-

- تنقية المياه
- نمو النباتات

المعالجة الحجمية مثل:-

- معالجة الغاز المسال
- معالجة النفايات

المعالجة الكيميائية مثل:-

- ترسيب رقائق الماس
- بودرة السيراميك

مصادر الضوء مثل:-

- مصابيح الكثافة العالية
- مصابيح الضغط المنخفض
- مصادر إضاءة خاصة

في الطب مثل:-

- معالجة السطوح

• **تعقيم الآلات الطبية**

✓ **مفاعلات الأندماج النووي Thermonuclear Function**

في تفاعلات الأندماج النووي تتحد نوى خفيفة (He،H) لتكون نوى أثقل ينتج عنه تحرير أو أطلاق كميات كبيرة من الطاقة وذلك لأن مجموع كتل النوى الناتجة من التفاعل هو أقل من مجموع كتل النوى الداخلة في التفاعل لذلك فأن الفرق في الكتل سيظهر بشكل طاقة متحررة مقدارها ΔE.

وحسب معادلة انشتاين:

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

أن أهم التفاعلات التي يمكن أستغلالها في أنتاج طاقة الأندماج النووي هي:

$$1H^2 + {}_1H^2 \longrightarrow 2He^3 + {}_0n^1 + 3.27\ MeV$$

$$1H^2 + {}_1H^2 \longrightarrow 1H^3 + {}_1H^1 + 4.03\ MeV$$

$$1H^2 + {}_1H^3 \longrightarrow 2He^4 + {}_0n^{21} + 17.58\ MeV$$

$$1H^2 + {}_2He^3 \longrightarrow {}_2He^4 + {}_1H^1 + 18.34\ MeV$$

إن مقدار الطاقة المتحررة في هذه التفاعلات هي مقدار كبير جداً بالمقارنة مع الطاقة المتحررة من إنشطار النواة. ولتحقيق تفاعل إندماج يجب أن تقترب النوى من بعضها مسافة تصل الى $10^{-14}\ m$ لكي يظهر تأثير فعل القوى النووية قصيرة المدى، فلأجل التغلب على قوى التنافر الكهروستاتيكي يجب أن تكون الطاقة الحركية للنوى المتفاعلة مساوية أو أكبر من طاقة جهد كولوم

التي تعطى بالعلاقة:

$$u_c = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{4\pi\epsilon_o R}$$

حيث أن Z , $Z_1{}_2$ الأعداد الذرية للعناصر المستخدمة بينما معادلة الطاقة الحركية للجسيمات

$$K.E = \frac{1}{2}mve^2 = \frac{3}{2}KT$$

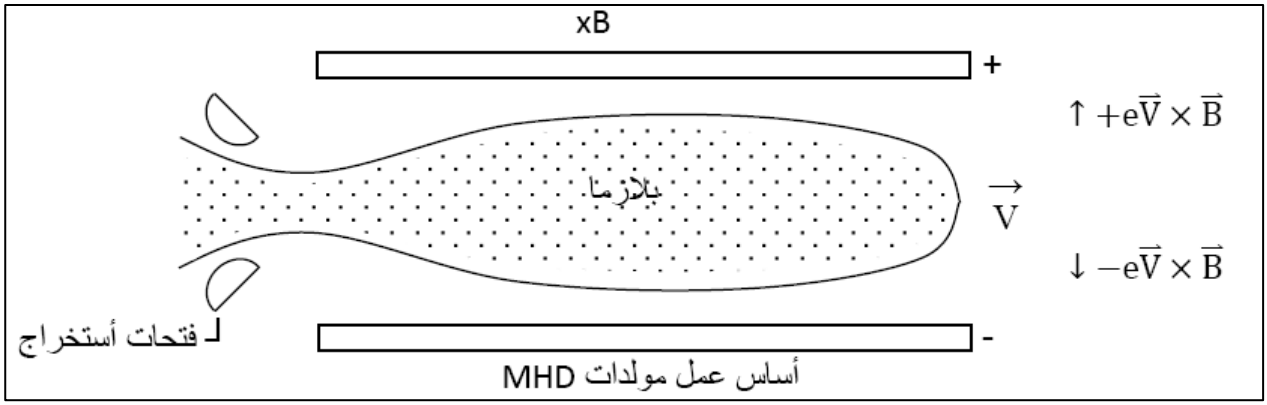
حيث T : درجة الحرارة المطلقة K : ثابت بولتزمان = 10×38.1^{-23} Joule/k^{o}

فحتى نحصل على تفاعل إندماجي يجب أن تكون الطاقة الحركية للجسيمات مساوية أو أكبر من طاقة جهد كولوم لذا يتم أحداث التفاعلات النووية الإندماجية بواسطة تصادم أيونات البلازما .وبالنظر لصعوبة إحتواء البلازما يتم إنتاج البلازما لفترة زمنية معينة وبكثافة معينة كافية للحصول على سلسلة مستمرة من تفاعلات نووية مسيطر عليها.

- ✓ **المولدات المغناطوهيدروديناميكية Magneto Hydrodynamic (MHD)**

من التطبيقات المهمة لفيزياء البلازما هي أمكانية تحويل الطاقة الحرارية للبلازما بشكل مباشر إلى طاقة كهربائية بواسطة مايسمى بالمولد المغناطوهيدروديناميكي. إن هذا النوع من المولدات يعتمد على إمكانية إستخدام مجالات مغناطيسية عمودية على إتجاه حركة البلازما لغرض إبطائها

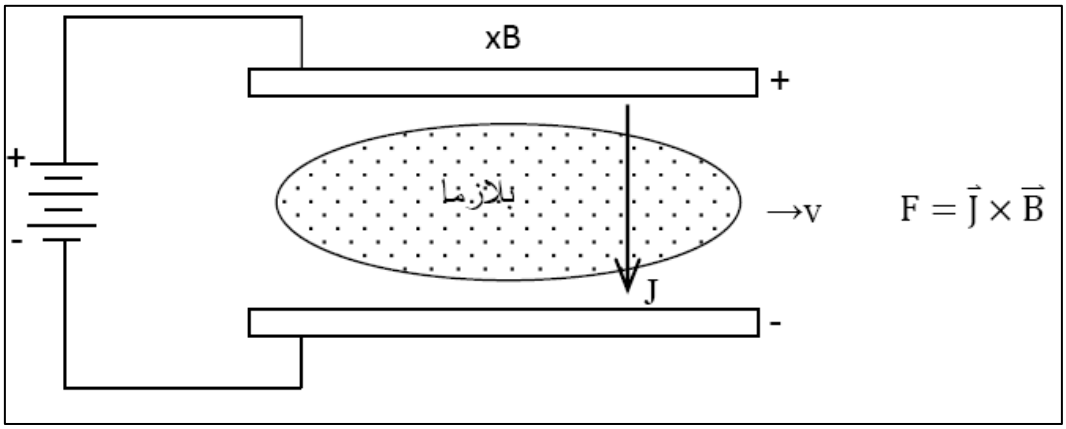
وتحويل طاقتها إلى طاقة كهربائية.



ولتوليد الطاقة الكهربائية في هذا النوع من المولدات نحتاج إلى سرعة عالية للبلازما الداخلة إضافة إلى معامل توصيل كهربائي عالي وكثافة عالية.

✓ **الدفع النفاث بواسطة البلازما Plasma Jet Propulsion**

هنا مبدأ العمل معاكس لما في المولدات المغناطوهيدروديناميكي (MHD) أي تقوم بتحويل الطاقة الكهربائية الى طاقة ميكانيكية وذلك بأستخدام مجالين أحدهما كهربائي والآخر مغناطيسي يعملان بأتجاهين متعامدين على بعضهما.



أساس عمل محركات الدفع النفاث بالبلازما

وهنا البلازما يجب أن تكون منخفضة الكثافة جداً لكي تقلل من التصادمات

بين جسيمات البلازما وبالتالي نحصل على سرعات أنجراف عالية.

إن أستخدام البلازما يوفر سرعات تصل ألى مئة مرة بقدر سرعة خروج الغازات الإعتيادية الناتجة عن إحتراق الوقود الكيمياوي. ودائماً ماتستخدم من منظومات الدفع بالبلازما بعد خروج الصاروخ عن مدى الجاذبية الأرضية، لذا يتم إستخدام أنظمة الدفع الكيمياوية لهذه الصواريخ كمرحلة أولى.

- ✓ **أجهزة ثنائي البلازما Plasma Diod**

وتستخدم في توليد التيار الكهربائي بأستخدام قطبين أحدهما ساخن والآخر بارد لتحويل جزء كبير من الحرارية الى تيارات كهربائية.

- ✓ **في تطبيقات الليزر**

ويتم أستخدام مضخات البلازما والتي تستخدم في تكبير الموجات الكهرومغناطيسية والتي تستخدم في أنتاج الليزر.

- ✓ **البلازما في علوم الفضاء والفلك**

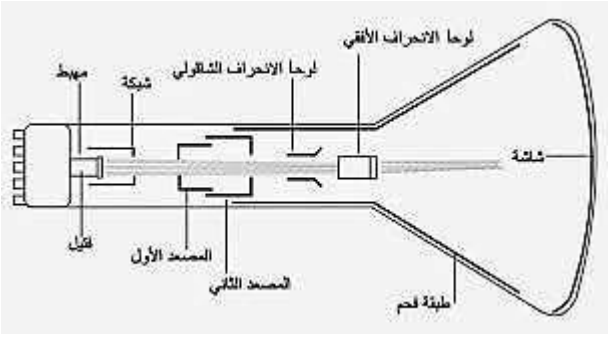
تُعتبر البلازما أكثر أطوار المادة العادية شيوعًا في الكون، سواءً بالكتلة أو بالحجم. فوق سطح الأرض، يُعتبر الأيونوسفير مكونًا من البلازما، ويحتوي الماغنيتوسفير على البلازما. وخلال النظام الشمسي، يحتوي الفضاء بين الكواكب على البلازما المقذوفة عبر الرياح الشمسية، ممتدة من سطح الشمس حتى منطقة التوقف الشمسي. علاوة على ذلك، يمتلئ بالبلازما كل من النجوم

البعيدة ومعظم الفضاء بين النجوم والفضاء بين المجرات، تحت كثافات منخفضة جدًا. تُرصد البلازما الفيزيائية الفلكية أيضًا في القرص المُزوِّد حول النجوم أو الأجسام المصمتة مثل الأقزام البيضاء أو النجم النيوتروني أو الثقوب السوداء بالقرب من نُظم النجوم الثنائية. ترتبط البلازما بقذف المواد في التدفق المادي الفلكي، والذي رُصد ببناء الثقوب السوداء أو في المجرات النشطة مثل M87's والتي تمتد بنحو 5 آلاف سنة ضوئية

شاشات البلازما

الشاشات التقليدية

منذ أكثر من 70 عاماً اعتمدت أجهزة التلفزيون على شاشات الكاثود Cathode ray tube الموضحة في الشكل التالي. حيث تتكون شاشات الكاثود من مدفع إلكتروني في انبوبة مفرغة وتنطلق الالكترونات المعجلة باتجاه شاشة فسفورية، وباستخدام مجالين كهربيين متعامدين يمكن مسح الشعاع الإلكتروني على الشاشة بمعدل يصل إلى 25 مرة في الثانية، تعمل الالكترونات عند سقوطها على ذرات الفسفور المكونة للشاشة على اثارتها مما تجعلها تعطي ضوء لتتخلص من اثارتها. هذا الضوء المنبعث من تلك العناصر الضوئية)ذرات الفسفور(تكون الصورة التي نشاهدها. هذه الصورة التي نحصل عليها من شاشات الكاثود صورة واضحة ومقبولة ولكن حجم الشاشة الكبير مما يعني عمق كبير لجهاز التلفزيون ويصبح الجهاز ثقيل ويشغل حيز كبير من الغرفة الموجود بها.



نعلم ان شاشات الكاثود في التلفزيون الملون تعمل من خلال تقسيم الشاشة إلى مربعات صغيرة تسمى البكسل pixel وهو عنصر الصورة ويكون هناك ثلاثة بيكسلات لكل من الالوان الأساسية وهي الأحمر والأخضر والأزرق وتكون موزعة على مساحة الشاشة وعند اصطدام الالكترونات بأي من هذه البكسلات يعطي ضوء بلون البكسل وهذا يكون الصورة.

شاشات البلازما

تعمل شاشات البلازما بنفس الآلية حيث يتكون كل بكسل من ثلاث ألوان)الأحمر والأصفر والأزرق(ولكن لا يوجد الشعاع الإلكتروني ولا يوجد الشاشة الفوسفورية انما يتم توليد هذه الالوان الثلاثة في كل بكسل من خلال fluorescent lights ضوء فلورسنت ومن خلال التحكم ودرجة شدة كل ضوء فلورسنت ينتج اللون المطلوب وهذا يحدث على كل بكسلات الشاشة وعندها تتكون الصورة الكاملة.

يتم توليد ضوء الفلورسنت من خلال

البلازما، وبالطبع تتولد هذه البلازما داخل مجال كهربائي كبير ناتج عن فرق جهد عالي مما يؤدي إلى انجذاب الالكترونات إلى الطرف الموجب والأيونات إلى الطرف السالب فتصطدم الالكترونات مع الايونات مما يؤدي إلى أثارة ذرات الغاز في البلازما وينتج عن هذه الاثارة تحرر طاقة في صورة فوتونات ضوئية كما هو الحال في المصابيح الفلوريسنت التي نستخدمها للاضاءة.

يتم في شاشات البلازما استخدام غاز مكون من ذرات النيون وذرات الزينون وعند اثارة هذا الغاز بالطريقة سابقة الذكر نحصل على فوتونات في مدى الترددات الفوق بنفسجية التي لا ترى بالعين المجردة ولكن هذه الفوتونات تستخدم للاثارة للحصول على فوتونات بترددات في المدى المرئي.

الغازات الأيونية هي التي تقتصر بالتفاعل عبر ملايين الخلايا الصغير لتشكل لنا صورة مرئية عبر المرآه البلازمية.

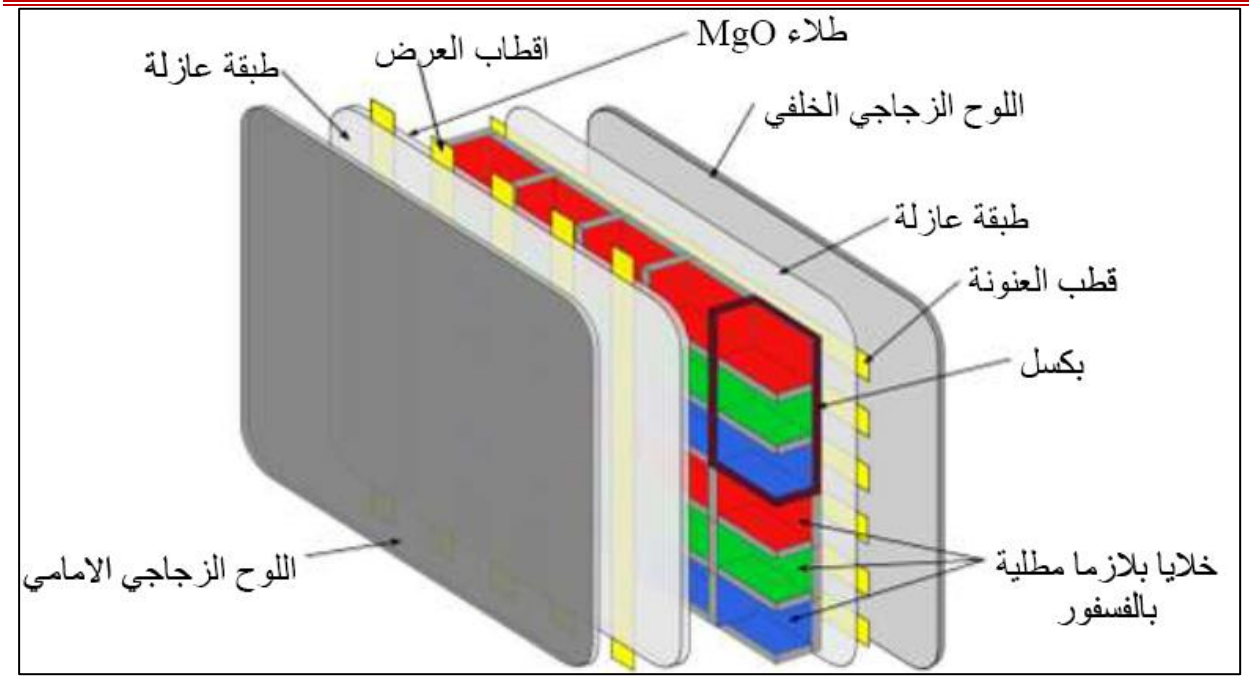
فكرة عمل شاشات البلازما

ان ذرات النيون وذرات الزينون تتوزع على ألاف الخلايا المحصورة بين لوحين من الزجاج)اللوح الزجاجي الامامي واللوح الزجاجي الخلفي(. يتصل باللوح الزجاجي الأمامي قطب)الكترود(يسمى قطب العرض)الشاشة(Display Electrode ويتصل باللوح الزجاجي الخلفي قطب)الكترود(يسمى بقطب العنونة Address Electrode. وبالتالي تصبح كل خلية ضوئية)تحتوي على ذرات النيون والزينون(محاطة بقطب العرض من الامام وقطب العنونة من الخلف.

تحيط مادة عازلة غير موصلة للكهرباء dielectric material قطب العرض ومغطاة بطبقة واقية من اكسيد المغنيسيوم لتكون بين الخلية الضوئية ولوح الزجاج الأمامي. كما هو موضح في الشكلين) 1(.

نلاحظ من الشكل)1(اللون الأصفر للالكترود الأمامي والخلفي والخلايا ضوئية الموضحة باللون الأزرق ويوجد بجانبها خلية ضوئية خضراء وأخرى حمراء، كذلك موضح الطبقة الواقية الشفافة من MgO.

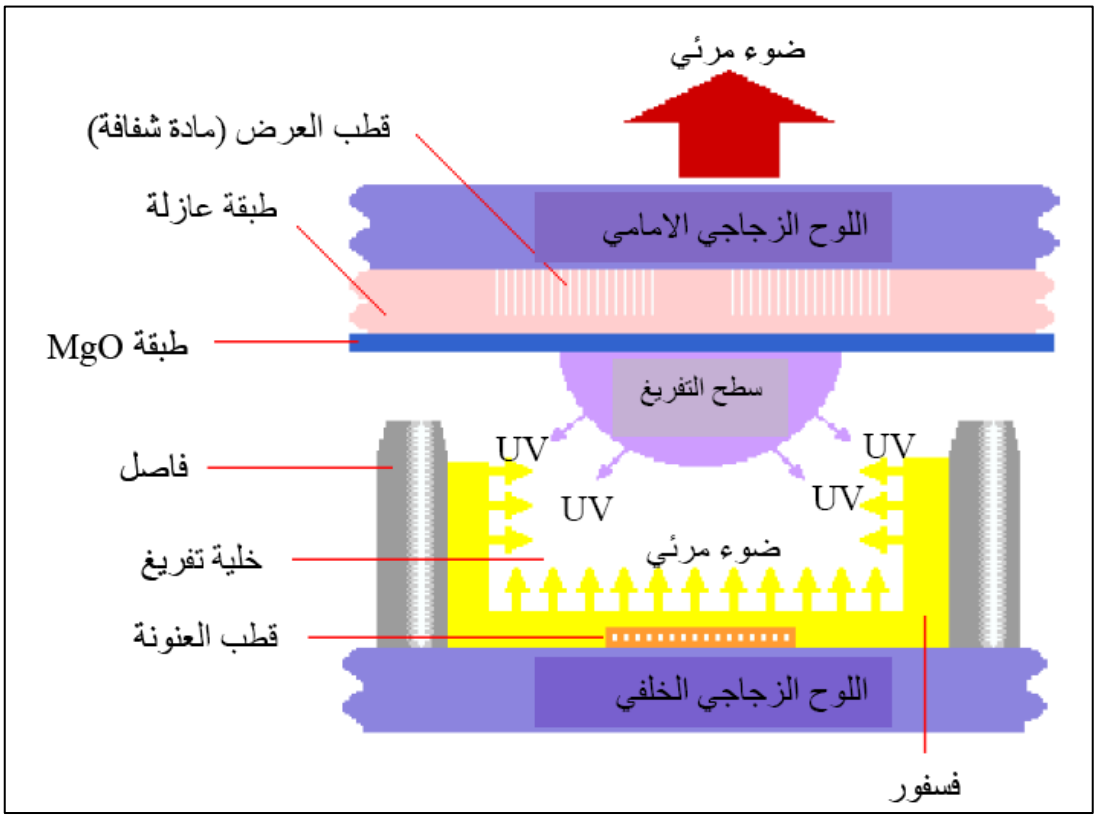
كما نلاحظ كيف تترتب الخلايا الضوئية على مساحة الشاشة وتقسم الشاشة الى وحدات صغيرة تسمى عناصر الصورة وتدعى بكسل وكل بكسل عبارة عن ثلاثة خلايا ضوئية للألوان الأحمر والأخضر والأزرق. ونلاحظ أيضا اشرطة القطب)اللون الاصفر(تكون مرتبة في صفوف متوازية ويكون قطب العنونة ممدد على طول الخلايا الضوئية ذات اللون الواحد ويكون قطب العرض ممددا على طول البكسل.وهذا يكون على طول وعرض الشاشة مما يشكل في النهاية شبكة من القطب.



وعملية تأين الغاز في داخل اية خلية ضوئية يتحكم فيه كمبيوتر خاص للشاشة حيث يتحكم في توجيه الشحنة الكهربية الى الالكترودين المتعامدين فيحدث التفريغ الكهربي في تلك الخلية وتتكرر هذه العملية الاف المرات في جزء من الثانية.

عندما يشحن الالكترودين المتعامدين)المتقاطعين(يصبح هناك فرق جهد بينهما فيمر تيار كهربي في تلك الخلية الضوئية التي تحتوي غاز النيون والزينون فيتأين الغاز ويتحول إلى بلازما وتنطلق اشعة كهرومغناطيسية

)فوتونات(فوق بنفسجية. كما في الشكل) 2(.



تعمل الاشعة الفوق بنفسجية المنطلقة من البلازما على اثارة المادة الفسفورية المغلفة للخلية الضوئية حيث تمتص الكترونات ذرات الفسفور فوتون الاشعة فوق البنفسجية وينتقل الالكترون الى مستويات طاقة أعلى وعند عودة الالكترون المثار الى مستوى طاقته الأصلي يعطي ضوء في المدى المرئي.

كما ذكرنا سابقا فإن كل بكسل مكون من ثلاث خلايا ضوئية وكل خلية ضوئية مغلفة من الداخل بمادة فسفورية تعطي ضوء أحمر والثانية تعطي ضوء أخضر والثالثة تعطي الضوء الأزرق)أي أن هناك ثلاث انواع مختلفة من الفسفور لكل خلية ليعطي الألوان الأساسة.(

وبالتحكم بشدة تيار النبضات الكهربية الموجهة بواسطة الكمبيوتر إلى الخلايا

الضوئية المختلفة يمكن الحصول على خليط من الألوان الاساسية لتعطي في المحصلة كل الالوان الممكنة. وحيث أن التحكم يصل إلى كل بكسل فإن الصورة الناتجة من الشاشة ذات دقة عالية مهما كانت الزاوية التي ننظر إليها إلى الشاشة.

ميزات شاشات البلازما

-وزن الشاشة خفيف ومسطحة تماماً وسمكها لا يزيد عن 15 سنتيمتر مما يجعل تعليقها على الجدران ممكن.

-مدى رؤية كبير يصل إلى 160 درجة وصورة واضحة والوان زاهية ودقة عالية.

-لا تتأثر بالمجالات المغناطيسية حولها وبالتالي يمكن تثبيت نظام سمعي عالي الجودة دون القلق على التأثير المغناطيسي للسماعات على الشاشة.

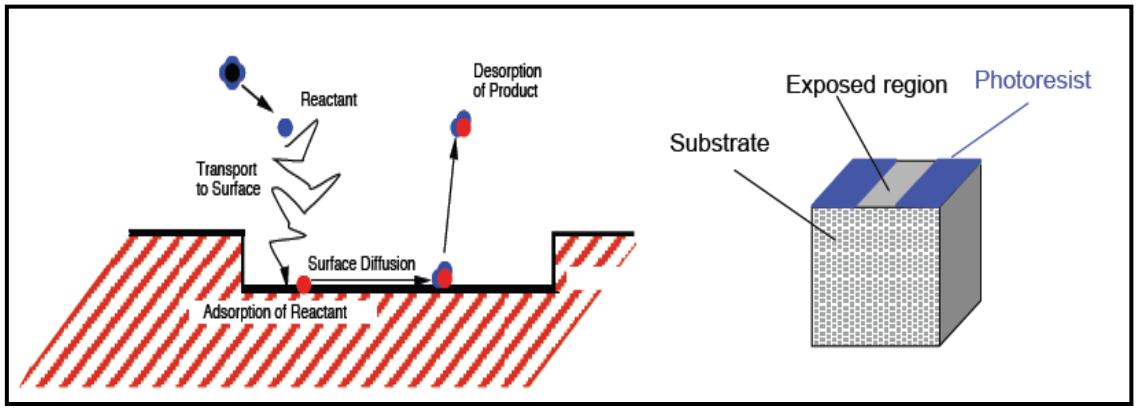
عيوب شاشات البلازما

هذه الشاشات تصنيعها معقد وتحتاج الى تكنولوجيا متقدمة وباهظة الثمن من حيث سعرها.

تطبيقات بلازما التفريغ الكهربائي

عملية الحفر (Etching Process)

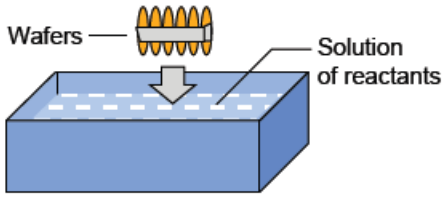
ان الحفر بشكل عام يعني عملية ازالة ذرات او جزيئات من سطح المادة المراد معالجتها وفق خريطة هندسية محددة (Mask) وتتم العملية بميكانيكية مختلفة (كيميائية- فيزيائية- فيزوكيميائية)



وتستخدم عدة طرق لاجراء عملية الحفر من اهمها الحفر الكيميائي الرطب (Wet chemical etching) والحفر الجاف (Dry etching)

1. الحفر الكيميائي الرطب (Wet chemical etching): امتاز هذا النوع من الحفر بأستخدامات واسعة في العقود الاولى من الصناعة للدوائر الالكترونية وذلك لكونه طريقة ناجحة ورخيصة الثمن كما ويمكن الحصول على عملية حفر جيدة.

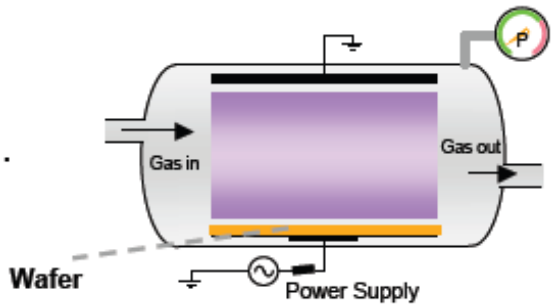
تتم العملية بغمر الاساس بمحلول كيميائي معين لمدة زمنية حددت مسبقاً تتم خلالها عملية الحفر نتيجة التفاعل الكيميائي الذي يحصل بين الاساس والمحلول كما في الشكل الاتي :



ان التطور السريع الذي شوهد في القرن العشرين في عملية تصنيع الدوائر المايكروالكترونية ادى الى ظهور الحاجة لحفر اخاديد ذات أبعاد صغيرة جداً لذلك تطلب تقنيات جديدة للحفر فظهرت طريقة الحفر الاخرى.

2. الحفرالجاف (Dry etching)

ان هذا النوع من الحفر هو تقنية حديثة ومتطورة وتلبي متطلبات التطور العلمي الذي رافق صناعة نبائط اشباه الموصلات في الوقت الحاضر وتسمى عدة تسميات الحفر بالبلازما (Plasma Etching) الحفر بالترذيذ الفعال (Reactive Sputter Etching) والحفر الايوني (Reactive Ion Etching) والحفر المساعد بالبلازما (Plasma Assisted Etching).



تتم هذه العملية عن طريق ادخال غاز عند ضغط معين الى حجرة التفاعل (Chamber) ويتم تسليط فرق جهد بين الاقطاب مما يؤدي الى حدوث تفريغ توهجي للغاز، تتولد اصناف عديدة من الجسيمات في محيط البلازما مثل (الايونات، الالكترونات، الفوتونات، الجذور الحرة، المتعادلات).

تقوم هذه الاصناف الفعالة بالانتشار داخل حجرة التفاعل وقصف سطح

الاساس عندها يحدث تفاعل بين ذرات سطح الاساس عندها يحدث تفاعل بين ذرات السطح وبينها، حيث تتحول هذه الذرات من الحالة الصلبة الى نواتج طيارة في التفريغ التوهجي والتي يمكن ازالتها عن طريق منظومات السحب المستخدمة أثناء التشغيل.

ميكانيكيات الحفر بالبلازما:

هناك عمليات تحدث داخل حجرة البلازما في محيط البلازما بواسطة الاليات الخاصة به وهي عمليات فيزيائية وكيميائية وفيزوكيميائية بالاضافة الى تفاعل البلازما مع سطوح المادة.

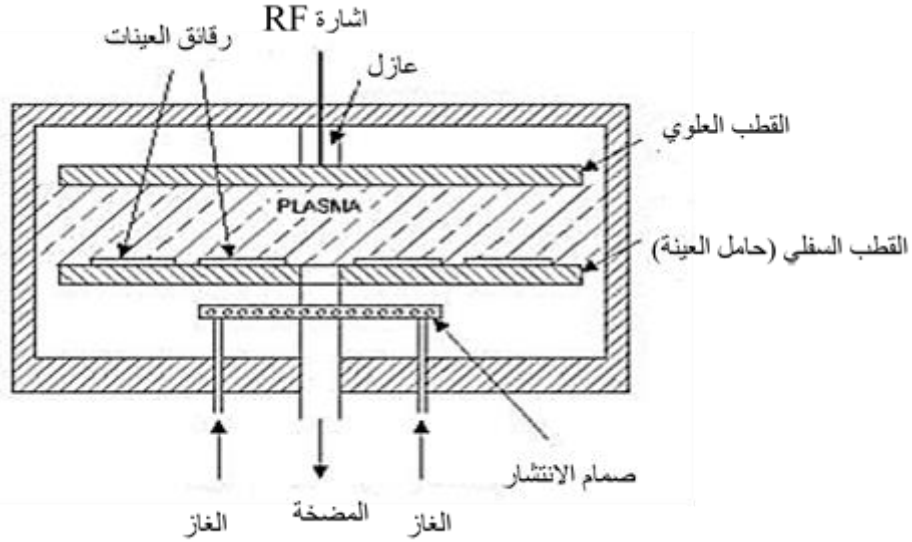
ان العمليات التي تحدث داخل حجرة التفاعل ابتداءٍ من دخول الغاز وانتشاره داخل الحجرة وعلى جدرانها هي عملية امتصاص واد امتصاص لجزيئات الغاز والتأين والانفصال واعادة الاتحاد كذلك الترسيب واعادة الترسيب وهذة عمليات معقدة جداً حيث تعتمد على متغيرات كثيرة جداً:

1. ضغط الغاز. **2.** الجهد المسلط بين الاقطاب. **3.** الشكل الهندسي للقطاب. **4.** الغاز المستخدم والمادة المصنوعة منها الاقطاب.

في عملية الحفر بالبلازما عندما تكون الجذور الحرة هي السائدة او هي المسؤولة عن تحقيق عملية الحفر فان العملية الكيميائية تكون هي السائدة وان خواص هذا الحفر سوف تكون (حفر اتجاهي وموحد الخواص وذات انتقائية جيدة لعملية الحفر)، اما عندما تكون الايونات هي المسؤولة عن تحقيق عملية الحفر

(عملية فيزياوية) تكون النتيجة (حفر اتجاهي متباين الخواص وانتقائية قليلة لعملية الحفر)

وفي حالة تطبيق الحالتين (فيزوكيميائية) معاً تتحقق عملية الحفر سريعة (سريعة اتجاهية يطلق عليها تسمية الحفر الايوني المساعد).



منظومة حفر البلازما بحجرة التفاعل

مميزات البلازما المستخدمة في الحفر:

1. انخفاض نسبي في درجات الحرارة حيث تتراوح بين ^{o}C (25-50).
2. انخفاض الضغوط حيث تتراوح نسبتها بين Torr (1-0.01).
3. نسبة 99% من الجسيمات في هذا النوع من البلازما هي جذور حرة والتي تشكل المصدر الرئيسي للفعالية الشديدة للبلازما.
4. تكون نسبة الايونات عادة اقل من 1% من العدد الاجمالي.

بعد ان تعرفنا على انواع الحفر وخصائص او مميزات البلازما المستخدمة في

الحفر يجب تسليط الضوء على العوامل التي تحدد خواص الحفر بالبلازما والحفر الكيمائي، فان كل نوع من الانواع المذكورة اعلاه له خواص لابد لنا من معرفتها وهذه العوامل متصلة بمعالجة المواد والخواص التي نحصل عليها اي انها تلك العوامل التي تقيم عملية الحفر كمياً ونوعياً:

1. **الانتقائية:** هي النسبة بين معدل حفر الغشاء (Film) الى حفر الاساس وان النسبة العالية لـ S تعني عملية حفر افضل في مجال الصناعات المايكرالكترونية

Selectivity (S) =Rate of Etch Film / Rate of Etch Substrate

وتعتمد الانتقائية على:

1. مادة الغشاء والاساس.
2. نوع الغازات المستخدمة في عملية الحفر.
3. نوع المنظومة المستخدمة في عملية الحفر.
4. العوامل المؤثرة بشكل مباشر على عملية الحفر (ضغط وجهد).

2. **الاتجاهية Directionality :**

هي النسبة بين معدل الحفر في الاتجاة الافقي الى معدل الحفر في الاتجاة العمودي

Lf = Horizontal Rate of Etch / Vertical Rate of Etch

ونحصل على حفر موحد عندما Lf=1 وحفر متباين عندما تكون قيمتها تتراوح

.(0-1)

وتعتمد الاتجاهية على:

1. نوع المنظومة المستخدمة في عملية الحفر.
2. نوع الغازات المستخدمة في عملية الحفر.
3. العوامل المؤثرة في عملية الحفر.

الحفر المتباين الخواص Anisotropy Etching

عملية الحفرتحدث بالاتجاهات العمودية والافقية لسطح المادة المعالجة وهدف الحفر هو لتحقيق طبع الشكل الهندسي للخارطة الموجودة على القناع بصورة تامة على سطح الاساس وذلك للسيطرة على معدلات الحفر

Anisotropy A = Depth / Undercut = D/U

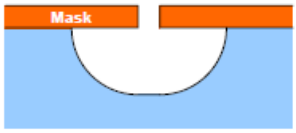
ان قيمة A هي التي تحدد خواص الحفر بالبلازما:

a. عندما A=1 يكون الحفر موحد الخواص (Isotropic) وهو حفر غير مرغوب فيه لانه يؤدي الى حصول قطع تحتي وتكون معدلات القطع متساوية في كل الاتجاهات وهذا النوع يحصل عندما تكون الجذور الحرة المتولدة في محيط البلازما ومنه نحصل على انتقائية عالية الحفر.

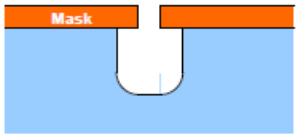
b. عندما A=0 يتحقق حفرمتباين الخواص (Anisotropic) وهذا النوع من الحفر تكون فيه معدلات الحفر العمودية اسرع من معدلات الحفر الافقية وهذا مايولد قطع تحتي في سطح الاساس وهذا غير مرغوب فيه في الصناعات

المتغيرات	الحفرالجاف Dry Etching	الحفر الرطب Wet Chemical

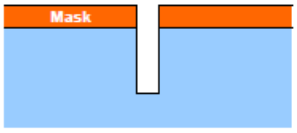
الالكترونية الدقيقة لانه يؤدي الى تلف سطح الاساس لذلك يكون الحفر االمتباين الخواص هو المرغوب في اغلب التطبيقات وذلك لكون الحفر يكون بالاتجاه العمودي اكثر من الاتجاهات الاخرى لذا يكون التحكم بعملية الحفراكثر.



(a) الحفر الموحد الخواص



(b) الحفر المتباين الخواص



(c) الحفر الاتجاهي

خواص الحفر

ويمكن المقارنة بين خصائص الحفر الجاف والحفر الرطب من خلال الجدول التالي:

الانتقائية	قليلة	عالية جداً
الاتجاهية	عالية	قليلة
سرعة الحفر	بطيئة 0.1μm/min	سريعة 1μm/min
السيطرة على نسبة	جيدة نتيجة البطء	صعبة
تخفيف اخاديد دون	ممكن	غير ممكن
محددات العملية	متعددة	قليلة
الجانب النظري	متعقد جداً	مفهوم
الكلفة الكيميائية	قليلة	عالية
كلفة الاجهزة والمعدات	عالية جداً	رخيصة
التاثير على البيئة	قليل	عالي
الاضرار الاشعاعية	قليلة	غير موجودة

العوامل الاساسية المؤثرة على عملية الحفر بالبلازما:

هناك عدة عوامل تؤثر في عملية الحفر بالبلازما التي تؤثر ايجابياً وسلبياً على عملية الحفر المراد القيام بها والتي يجب ان يتم السيطرة عليها:

1. القدرة الداخلة للبلازما:

ان مجهز القدرة المستخدم في انظمة البلازما يكون اما نوع RF او DC عند زيادة القدرة المجهزة للبلازما وعند ضغط تشغيلي ثابت تزداد كثافة البلازما يرافقها زيادة قيمة الجهد عبر الغلاف البلازمي مما يؤدي الى ارتفاع في طاقة الايونات القاصفة بحدود (10-700)eV هذه الطاقة العالية للايون تؤدي الى ناتج ترذيذ عالي وبالتالي حصول اضرار كبيرة لسطح الاساس.

وان زيادة الجهد عبر غلاف البلازما يؤدي الى تعجيل الالكترونات الثانوية المنبعثة من سطح القطب الى محيط البلازما وبطاقة عالية وهذه الزيادة في طاقة الالكترون تؤدي الى زيادة في كثافة كل من الالكترونات والجذور الحرة

وهذا بدورة يؤدي الى زيادة في معدل الحفر كدالة لزيادة القدرة المجهزة للبلازما وان كثافة القدرة محصورة بمدى (W/cm^2 (0.1-5) من منظومة الاقطاب المتوازية.

2. ضغط الغاز

يعتبر الضغط من المحددات المهمة في سلوك عملية الحفر بالبلازما بسبب العمليات الفيزياوية التى تحدث في محيط البلازما في وقت واحد فعند ارتفاع ضغط الغاز فان متوسط المسار الحر لمكونات الجسيمات في البلازما يكون قليل حسب المعادلة :

$$\lambda = 1 / P$$

λ طول المسار الحر (cm)

P الضغط

مما يؤدي الى زيادة كبيرة في انتاج الايونات والجذور الحرة التي تلعب دوراً مهما في زيادة معدل الحفر، والضغط المثالي لعملية الحفر هو (1 mTorr-1 Torr) فعند زيادة الضغط فان اتجاهية الحفر سوف تقل بسبب زيادة احتمالية التصادمات مابين مكونات الغاز (جزيئات، الكترونات، جذور حرة).

3. تأثير التحميل:

يعرف على انه نقصان معدل الحفر بزيادة مساحة السطح المطلوب بالبلازما والذي ينتج عن تصوب (Depletion) النوع (Etchant Species) من اصناف

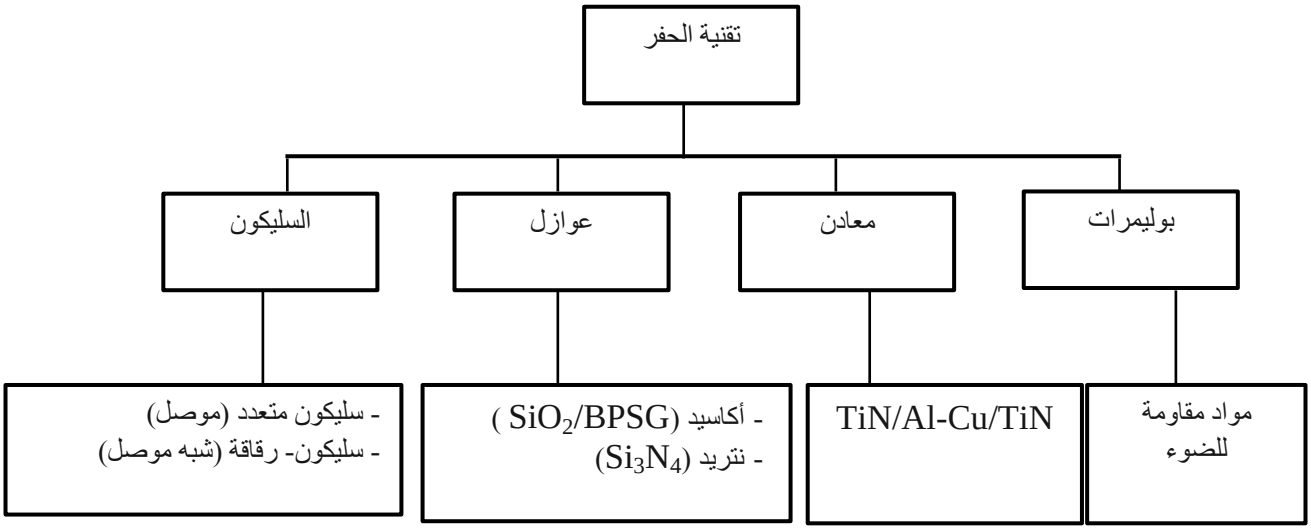
الجسيمات المتولدة في محيط البلازما بوساطة التفاعل ويعتمد التحميل على نوع المنظومات المستخدمة، وهناك نوعين من السطحي والحجمي.

4. تأثير درجة الحرارة:

أهمية تأثير درجة الحرارة على الرقائق أثناء عملية الحفر بالبلازما تكون كبيرة كون التفاعل الكيميائي المسبب للحفر يجري على سطح الاساس، وهذا يؤثر بشكل كبير على معدل الحفر بسبب تأثير طاقة التنشيط على التفاعلات الكيميائية لغاز الحفر مع سطح الاساس، ولمعالجة هذا التأثير ولتحسين كفائة اداء عملية الحفر بالبلازما يتم تبريد القطب الحامل للاساس ومن ثم الحد بشكل كبير من التأثيرات الضارة المصاحبة لزيادة درجة الحرارة على سطح الاساس.

الغازات المستخدمة في الحفر:

تكلمنا على الحفر بالبلازما فلا بد ان نلقي الضوء على الغازات المستخدمة في الحفر بالبلازما فيجب ان يكون ذو نقاوة عالية ورتبة الكترونية (Electronic Grad) فمثلاً غاز الفريون وهو غاز امين وغير سام وغير قابل للاشتعال ونضيف اليه احياناً بعض النسب من غازالنتروجين والاوكسجين والهيدروجين وهناك العديد من الغازات تختار حسب نوع السطح او المادة المراد حفرها. كما ويمكن حصر المواد القابلة للحفر بواسطة البلازما بالمخطط التالي:


تقنية الحفر
بوليمرات
معادن
عوازل
السليكون
مواد مقاومة للضوء
TiN/Al-Cu/TiN
- أكاسيد (SiO_2/BPSG)
- نتريد (Si_3N_4)
- سليكون متعدد (موصل)
- سليكون- رقاقة (شبه موصل)