



ATMOSFERİK BASINÇ PLAZMA YARIİLETKEN SİSTEMLER

Selçuk UTAŞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2022

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Selçuk UTAŞ

29/06/2022

ATMOSFERİK BASINÇ PLAZMA YARIİLETKEN SİSTEMLER

(Yüksek Lisans Tezi)

Selçuk UTAŞ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2022

ÖZET

Çalışmamızda Dc plazma sistemleri kullanılarak farklı değer ve ölçüm sonuçlarının incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Plazma sisteminde farklı yarı iletken malzemeler katot malzemesi olarak kullanılmıştır. SnO₂ kaplı cam plaka anot olarak kullanılmıştır. Farklı basınç (p) ve voltaj (V) değerlerinde elektrotlar arası mesafe 50 µm, 100 µm ve 300 µm olarak ayarlanıp teorik araştırmalar yapılmıştır. Voltajlar (V) ve basınçlar (p) değiştirilerek elektron yoğunluğu, uzaysal yük yoğunluğu, göç eden elektron yoğunluğu, elektron akım yoğunlukları, mobilite ve Townsend katsayıları hesaplanmıştır. Her katot için bu sonuçlar tekrarlanmış olup oluşum grafikleri eklenmiştir. Böylece bir plazma sisteminin hangi voltaj-akım karakteristiğine sahip olduğunu ve çalışma aralığını belirlemiş olduk. Yüksek voltaj değerlerinde sistemde kullanılan katot malzemesi işlevini yitirerek hiç istenilmeyen ark bölgesine geçiş yapmıştır. 22 torr, 66 torr, 100 torr, 220 torr, 760 torr basınçlar simülasyona eklenmiştir. Sonuçlar karşılaştırılarak yorumlanmış ve Glow boşalması oluşumları COMSOL Multiphysics programının Plazma modülü ve Dc modülü ile oluşturulmuştur.

Bilim Kodu : 20219
Anahtar Kelimeler : Mikro plazma hücresi, Gaz boşalma sistemleri, Dc Glow boşalması
Mobilite
Sayfa Adedi : 61
Danışman : Prof. Dr. Hatice Hilal KURT

ATMOSPHERIC PRESSURE PLASMA SEMICONDUCTOR SYSTEMS

(M. Sc. Thesis)

Selçuk UTAŞ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2022

ABSTRACT

In our study, different values and measurement results were examined by using Dc plasma systems. Different semiconductor materials were used as cathode material in the plasma system. SnO₂ coated glass plate was used as anode. At different pressure (p) and voltage (V) values, the distance between the electrodes was adjusted as 50 µm, 100 µm and 300 µm, and theoretical studies were carried out. Electron density, spatial charge density, migrating electron density, electron current densities, mobility and Townsend coefficients were calculated by changing voltages (V) and pressures (p). These results were repeated for each cathode and formation graphics were added. Thus, we have determined which voltage-current characteristic a plasma system has and its operating range. At high voltage values, the cathode material used in the system lost its function and moved to the undesirable arc region. Pressures of 22 torr, 66 torr, 100 torr, 220 torr, 760 torr have been added to the simulation. The results were interpreted by comparing and Glow discharge formations were created with the Plasma module and Dc module of the COMSOL Multiphysics program.

Science Code	: 20219
Key Words	: Micro plasma cell, Gas discharge systems, Dc Glow discharge, Mobility
Page Number	: 61
Supervisor	: Prof. Dr. Hatice Hilal KURT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren, karşılaştığım tüm zorlukların çözümlenmesinde yakın ilgisini esirgemeyen değerli hocam sayın Prof. Dr. H. Hilal KURT'a teşekkürlerimi borç bilirim. Bugüne kadar bana maddi ve manevi her konuda destek vererek sabırlarını esirgemeyen sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim. Beni çalışmamda motive eden ve tez yazım sürecinde destek olan Sayın H. Burak ÇALHAN'a ve kullandığım simülasyon programında bana yardımcı olan Evrim TANRIVERDİ'ye teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİK KISIM	25
2.1. Comsol Multiphysics	25
2.1.1. Geometri bölümü	25
2.1.2. Plazma bölümü.....	25
2.1.3. Mesh (örgü) bölümü.....	28
2.1.4. Çözümleme-zaman bölümü	28
2.1.5. Sonuçlar	28
3. COMSOL MULTIPHYSICS SİMÜLASYON SONUÇLARI.....	29
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	51
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	61

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Doğadaki ve laboratuvar ortamındaki bazı plazmaların parametreler.....	5
Çizelge 1.2. Bazı metallerin plazma ve dalga boyları	6
Çizelge 1.3. Önemli gaz boşalma aralıklarında frekans değerleri	7
Çizelge 1.4. Frekans aralığına göre plazma tipleri	7
Çizelge 1.5. Gaz boşalma tüpünde gerçekleşen çarpışma ve reaksiyon tipleri	15
Çizelge 1.6. Dc boşalmada aydınlanma bölge renk oluşumları.....	23
Çizelge 2.1. Yüzey reaksiyon formülleri	27

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Plazma hücresinin deneysel düzeneği.....	1
Şekil 1.2. Maddenin katı, sıvı, gaz, plazma halleri ve dönüşümleri.....	2
Şekil 1.3. Sıcaklıklara ve parçacık enerjilerine göre maddenin dört hali	2
Şekil 1.4. Elektron sıcaklık ve yoğunluklarına göre yapay (laboratuvar) ve doğal plazma sınıfları	3
Şekil 1.5. Çarpışma sonrasında atomun elektron ve iyon ayrılması (A: Atom)	12
Şekil 1.6. Atom ve iyonun katot ve anot plakalarına yönelmesi	13
Şekil 1.7. Plakalar arasında çarpışmalar	13
Şekil 1.8. Atomdan iyon; iyondan atoma doğru yönelim	13
Şekil 1.9. Pozitif ve negatif yüklerin anot-katot yönelimleri.....	14
Şekil 1.10. Photomultiplier (fotoçoğaltıcı) düzenek görüntüsü	14
Şekil 1.11. Gaz boşalma reaksiyonları.....	17
Şekil 1.12. Boşalma tüp örneği (K: Katot, A: Anot)	17
Şekil 1.13. Mikro elektronik gaz boşalma hücresi (MGBH)	17
Şekil 1.14. Gaz boşalma devresi temel görünümü ve I-U (I-V) karakteristiği.....	18
Şekil 1.15. Dc gaz boşalma esnasında oluşan bölgeler.....	18
Şekil 1.16. Paschen eğrisi ve denklemi.....	20
Şekil 1.17. Gaz boşalma esnasında tüpte oluşan bölgeler	21
Şekil 1.18. Dc boşalmada bölgelerde oluşan grafiksel oluşumlar	23
Şekil 3.1. $p=22$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ elektron yoğunluk oluşumları ..	29
Şekil 3.2. $p=22$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ uzaysal yük yoğunlukları	30
Şekil 3.3. $p=22$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ göç eden elektron dağılımları...	31
Şekil 3.4. $p=22$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ elektron akım yoğunlukları	32

Şekil	Sayfa
Şekil 3.5. $p=66$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ elektron yoğunluk oluşumları ..	33
Şekil 3.6. $p=66$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ uzaysal yük yoğunlukları	34
Şekil 3.7. $p=66$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ göç eden elektron dağılımları...	35
Şekil 3.8. $p=66$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ elektron akım yoğunlukları	36
Şekil 3.9. $p=100$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ elektron yoğunluk oluşumları	37
Şekil 3.10. $p=100$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ uzaysal yük yoğunlukları	38
Şekil 3.11. $p=100$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ göç eden elektron dağılımları	39
Şekil 3.12. $p=100$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ elektron akım yoğunlukları	40
Şekil 3.13. $p=220$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ elektron yoğunluk oluşumları.....	41
Şekil 3.14. $p=220$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ uzaysal yük yoğunlukları	42
Şekil 3.15. $p=220$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ göç eden elektron dağılımları	43
Şekil 3.16. $p=220$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ elektron akım yoğunlukları	44
Şekil 3.17. $p=760$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ elektron yoğunluk oluşumları	45
Şekil 3.18. $p=760$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ uzaysal yük yoğunlukları	46
Şekil 3.19. $p=760$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ göç eden elektron dağılımları	47
Şekil 3.20. $p=760$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ elektron akım yoğunlukları	48
Şekil 3.21. $d=300\ \mu\text{m}$ plazma tüpünde CdSe materyalinin basınçlara göre elektron yoğunluk oluşumları	49
Şekil 4.1. Grafen katotlu Argon gazlı plazma hücresinde $V=2000\ \text{V}$ $p=760$ torr basınçta elektron yoğunlukları a) $d=50\ \mu\text{m}$ b) $d=100\ \mu\text{m}$	52
Şekil 4.2. a) ZnSe ve b) GaSb katotlu $d=50\ \mu\text{m}$ Argon gazlı plazma hücresinde $p=760$ torr basınçta uzaysal yük yoğunlukları $V=2000\ \text{V}$	52

Şekil	Sayfa
Şekil 4.3. InGaAs-InP katodlu Argon gazlı plazma hücresinde $V=2000\text{ V}$ a) $p=22\text{ torr}$ b) $p=220\text{ torr}$ basınçta elektron akım yoğunlukları $d=100\text{ }\mu\text{m}$	53
Şekil 4.4. $d=100\text{ }\mu\text{m}$ InGaAs-InP katodlu Argon ortamında $p=760\text{ torr}$ plazma hücresindeki elektron yoğunlukları a) $V=1000\text{ V}$ b) 2000 V	53

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A	Amper
Ac	Alternatif akım
Ar	Argon
a	Townsend ilk iyonlaşma katsayısı
α_{iz}	Townsend katsayısı
Dc	Doğru akım
D_e	Elektron hareketliliği
D_i	İyon yayılması
D_n, n_n, u_n	Konveksiyon hızları
d_n	Çarpışmayla oluşan elektron
$\frac{dn}{dc}$	Hızı c ile c + d _n arasında olan parçacıkların sayısı
d_x	Kısmi mesafe
$\Delta\epsilon_j$	J(V) reaksiyon kaybı
E	Ambipolar difüzyonun oluşturduğu elektrostatik alan
e	Elektronun yükü
ϵ_0	Boşluğun geçirgenliği
σ_V	Çarpışmaların tesir kesiti
H₂	Hidrojen molekülü
He	Helyum
I	Fotoelektrik akım
I₀	Katottaki ilk fotoelektrik akım
J_i	İyon akışı
J_{i_bc}	Bohm akısı
K_e	Elektronların ısı iletkenliği
K_{jk}.T_e	Reaksiyon hızı katsayısı
k_B	Boltzman sabiti
k_j	Hız katsayısı

Simgeler**Açıklamalar**

L	Plazma boyutu
M	Büyümeye katkıda bulunan reaksiyon
m	Kütle
m_e	Elektron kütlesi
m_i	Başlangıçta hareket eden kütle
m_i	İyon kütlesi
m_t	Başlangıçta durgun olan kütle
N₂	Azot molekülü
N	Normal birim vektörü
N_n	Toplam nötr sayı yoğunluğu (1 / m ³)
N_D	Yoğunluk numarası
N_a	Nötral atom yoğunluğu
n	Anoda ulaşan elektron sayısı
n₊	Pozitif iyon bombardımanı ile salınan elektron sayısı
n - (n₀ + n₊)	Gazdan salınan elektron sayısı
n_e	Elektron yoğunluğu
n_e	Çalışılan bölgedeki iyon dağılımı
n_g	Birim hacimdeki gaz molekülleri sayısı
n_i	İyon yoğunluğu
n_j, n_k	Çarpışan iki türün sayı yoğunlukları
n_p	Plazma yoğunluğu
O₂	Oksijen molekülü
p	Gaz basıncı
P_{ind}	Endüktif ısıtma
ρ	Uzay yük yoğunluğu
ρ, η, u	Gaz yoğunlukları
Q	Yük
R_e	Elektron kaynağı
R_ε	Esnek olmayan çarpışmalardaki enerji kaybı
S_i	Reaksiyon iyon sayısı yoğunluğu katsayısı
SnO₂	Kalay oksit
T_e	Elektron sıcaklığı

Simgeler**Açıklamalar**

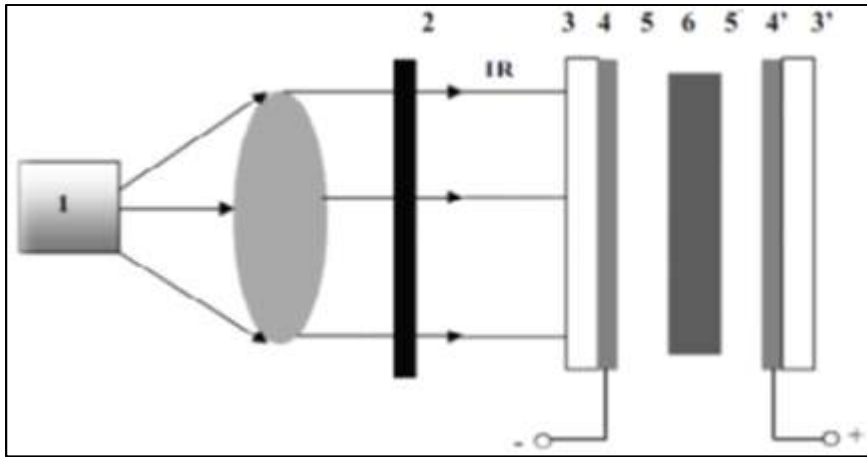
T_g	Gaz sıcaklığı
T_i	İyon sıcaklığı
τ	Ortalama çarpışma süresi
u_{Bi}	Pozitif iyon
μ_i	İyon hareketliliği
μm	Mikrometre
V	Voltaj
ν	Çarpışma frekansı
ν_L	Plazma Frekansı (Langmuir frekansı)
ν_T	Townsend verimli ikincil iyonizasyon
ν_i	Ortalama termal hareket hızı
v_i	Hareket eden kütlenin hızı
v_t	Başlangıçta durgun haldeki kütlenin hızı
ω_{pe}	Elektron osilasyon frekansı
ω_{pi}	İyon osilasyon frekansı
ω	Plazma salınım frekansı
x_j	J reaksiyonu için hedef türlerin mol fraksiyonu
γ_k	Kinetik yayınımdan toplam verime katkı payları
γ_p	Potansiyel yayınımdan toplam verime katkı payları
Z	Atom numarası
z_i	İyon temel yük sayısı
λ	Ortalama serbest yol
λ_D	Debye uzunluğu
Γ_e	Elektron akısı ($1/(m^2 \cdot s)$)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

atm	Deniz seviyesindeki standart atmosfer basıncı
E_{gap}	Interelectrode distance (elektrotlar arası mesafe)
eV	Elektron volt
ICP	İndüktif olarak eşleşmiş plazma
UK	Kırılma voltajı

1. GİRİŞ

Çalışmamızın amacı bir gaz tüp düzeneğinin içine yerleştirilmiş yarı iletken katot malzemesinin Dc voltaj beslemesi sonucunda plazma oluşumunu incelemektir. Plazma sistemleri ile kızılötesi görüntü çevirici tasarımı [1], optik çalışmalar, biyoloji ve biyomedikalde, uzay sanayisinde, materyal aşındırma veya sertleştirme teknolojisinde, tekstil, kağıt, otomobil, uçak endüstrisinde, elmas yapımında, yarıiletken teknolojisinde, iletişim teknolojisinde, kaplama ve dekorasyon teknolojisinde, sterilizasyon ve su arıtma sistemlerinde, tehlikeli ve zararlı atık arıtmada, güneş enerjisi ve optik sanayisinde, yeni teknolojik inşaatlarda, kristal büyütmede, füzyon araştırmalarında, sağlık (dezenfektasyon, sterilizasyon ve kanser tedavisi gibi) [2], teknoloji (çip ve entegre imalatı), askeri saldırı ve savunma sistemlerinde (kızılötesi dürbün, güdümlü füze, gece görüş sistemleri vb.), tarım amaçlı kullanılabilecek zirai maddeler ve günlük yaşamımızda kullandığımız birçok eşya (TV, floresan lamba vb.), gıda endüstrisinde [3, 4] ve daha birçok alanda plazma sistemleri kullanılmaktadır [5]. Plazma sistemleri çevremizde doğal olarak oluştuğu gibi laboratuvar ortamında da elde edilebilir [6]. En basit şekli ile laboratuvar ortamında oluşturulan plazma sistemi aşağıdaki şekildedir.



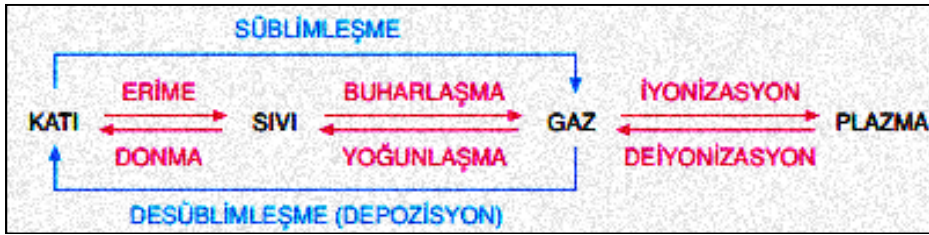
Şekil 1.1. Plazma hücresinin deneysel düzeneği

Bu plazma hücresinde;

1, ışık kaynağını; 2, Si filtre; 3-3', cam diskler; 4-4', düzlemsel saydam SnO_2 elektrotlar; 5-5', gaz boşalma aralıkları; 6, düzlemsel foto duyarlı yarı iletken katot plaka olarak verilmiştir [6].

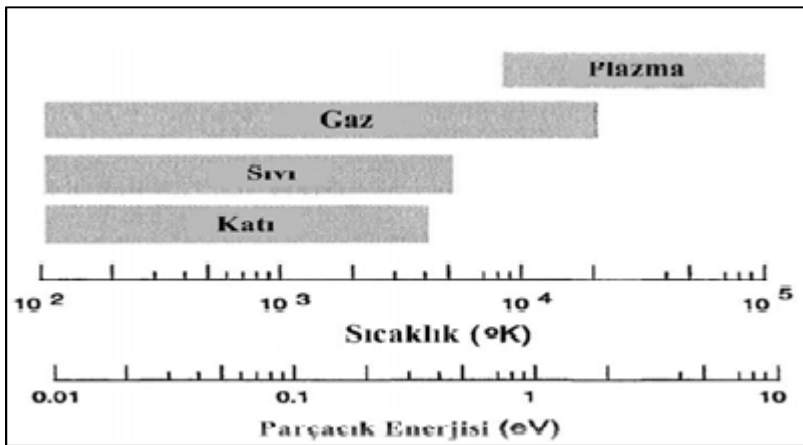
Plazma tanımı

Plazma çarpışmalar sonucu etrafına ışık yayıp ve elektrik ileten iyonize olmuş gazlardan oluşan sıcak ve soğuk şekillerde oluşan sistemlerdir [7]. Plazma, kısmen uyarılmış gaz, elektronlar, negatif iyonlar, pozitif iyonlar ve çeşitli uyarılmış atom moleküllerinden oluşmaktadır [8]. Plazma, nötralleştirilmiş elektriksel yüklerden oluşan ve serbest halde dolaşan pozitif ve negatif yüklü bileşenler topluluğudur. Plazma maddenin 4. halidir. Plazma ilk kez, 1928 yılında Irving Langmuir tarafından keşfedilmiştir [9, 10].



Şekil 1.2. Maddenin katı, sıvı, gaz, plazma halleri ve dönüşümleri

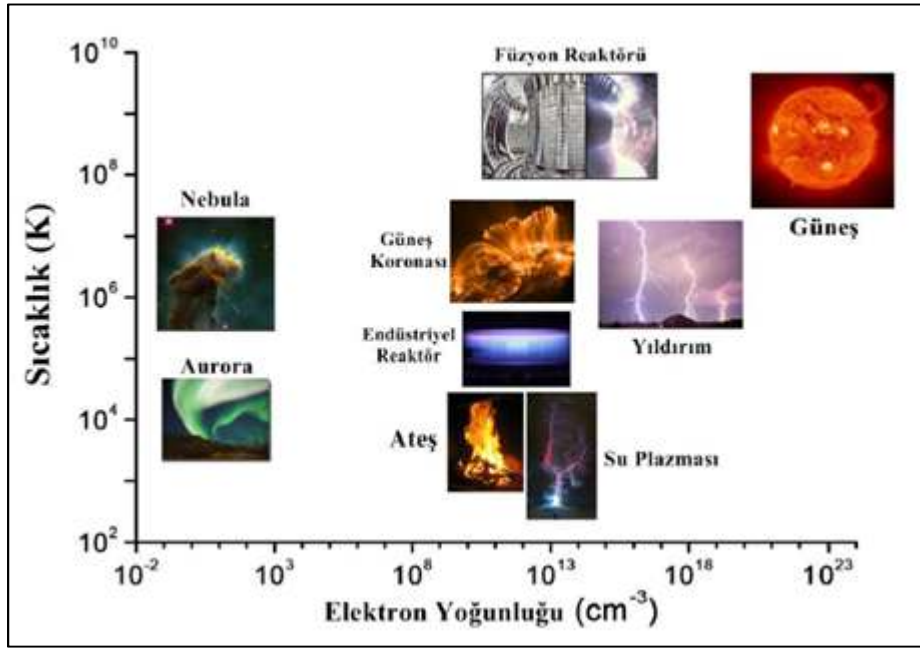
Plazma evrenin çok büyük kısmını (%99'dan fazla) kapsar. Serbest elektrik yükü sayesinde plazma yüksek bir elektrik iletkenliğine sahip olup ve elektromanyetik alanlardan kolayca etkilenir. Yüksek sıcaklık ve enerji yoğunluğuna sahiptir. Son zamanlarda ortaya çıkan virüs ve bulaşıcı hastalıkların meydana gelmesi ile sterilizasyonun ve dolayısıyla plazma tabanlı dezenfektasyonun önemi bir kez daha gündeme gelmiştir. Aşağıda sıcaklık ve enerjilerine göre maddenin halleri verilmiştir [11].



Şekil 1.3. Sıcaklıklara ve parçacık enerjilerine göre maddenin dört hali

Plazmanın sınıflandırılması

Plazmalar elektron sıcaklıklarına, elektron yoğunluklarına ve gaz basıncına göre sınıflandırılırlar. Genelde yapılan sınıflandırma sıcaklıklarına göredir. Buna göre termodinamik dengede olan, kısmen termodinamik dengede olan (termal plazmalar) ve termodinamik dengede olmayan (termal olmayan) plazmalardır [11].



Şekil 1.4. Elektron sıcaklık ve yoğunluklarına göre yapay (laboratuvar) ve doğal plazma sınıfları

Plazmaların elektron sıcaklığı ve elektron yoğunluklarına bakılarak durumları hakkında bilgiler edinmek mümkündür. Bazı plazma parametrelerini açıklayalım.

Plazma sıcaklığı

Plazmaların elektron parametrelerine göre sıcak ve soğuk plazma olarak sınıflandırılması aşağıdaki gibidir.

$T_e = T_g = T_i$ ise termodinamik dengede olan plazmadır ve sıcak plazma olarak isimlendirilir [12]. Sıcak plazmalar, 1000 K üzerinde gaz sıcaklığı olup genelde 10^4 - 10^5 K arasındadır. Elektrik arklarında, şimşek çarpmalarında oluşur [13].

$T_e \gg T_i > T_g$ ise termodinamik dengede olmayan plazmalardır ve bunlar soğuk plazma olarak isimlendirilir [14, 15]. Soğuk plazmalarda gaz sıcaklığı 1000 K aşağısında olup genelde 300-400 K olmaktadır. Elektron sıcaklığı 10^4 - 10^5 K olmasına rağmen iyon sıcaklıkları oda sıcaklıklarına yakındır [13]. Soğuk plazmalar 10 torr basınç ve 11 600 K elektron enerjisi altında uygulanmaktadır [16]. Soğuk plazma sistemleri pahalı olmaları, sınırlı yapısal özellikleri olması, fazla büyük boyutlu olmaları büyük dezavantaj oluşturmaktadır [17].

Debye uzunluğu

Plazma, nötr elektrik yüklü olmasına rağmen çok iyi bir iletkenidir. Elektrik alan ve manyetik alanla etkileşebilir. Elektrik ve manyetik alanlar plazma içerisindeki parçacıkların yörüngelerini kontrol ederler. Plazmalar içindeki iyon, elektron, uyarılmış atom molekülleri ve uyarılmış gaz nedeniyle manyetik alan veya elektrik alan oluşturabilirler [18]. Gazın iyonize hali olan plazmanın tanımlı olabilmesi için, plazmanın elektrostatik özelliklerini belirleyen, uzunluk ölçüsü anlamına da gelen, debye hacmi önemli bir kriterdir [19, 20]. Debye hacmi için gerekli koşullardan birincisi debye uzunluğu ile plazma boyutu, ikinci koşul debye hacmi ile parçacık yoğunluğu, üçüncü koşul ise çarpışma frekansı ile yüklü parçacıklar ve nötr atomların çarpışmaları arasında geçen ortalama zaman arasındaki bağıntılardan oluşmaktadır.

$$\lambda_D = \sqrt{\left(\frac{k_B \cdot T_e \cdot \epsilon_0}{n_e \cdot e^2}\right)} \quad \lambda_D \ll L \quad (1.1)$$

Debye uzunluğu [14, 18, 21, 22], plazma içerisinde yer alan iki yüklü parçacığın birbirine olan etkisinin elektrik alanda oluşturduğu mesafeyi verir. İyonlaşmış bir gazın plazma olarak tanımlanması plazma boyutunun (L), debye uzunluğundan çok büyük olmasına bağlıdır [21, 23]. Plazma karakteristiği için önemli olan bir şart ise, elektron yoğunluğu (n_e) ve iyon yoğunluğunun (n_i) eşit olmasına dayanan plazmanın nötr kalma (quasineutrality) durumudur. Plazma bölgesinin çevresini saran plazma kılıfı olarak adlandırılan ve plazmanın temas ettiği tüm yüzeyleri ayrıştıran koruyucu bölge vardır. Bu bölge içerisinde pozitif yük yoğunluğu elektron yoğunluğundan fazladır [18, 20].

$$N_D = \frac{4 \cdot n \cdot \pi}{3} \cdot (\lambda_D)^3 \quad N_D \gg 1 \quad (1.2)$$

Debye hacim içerisinde bulunan parçacık sayısı birden çok büyük olmalıdır [21, 23].

$$\omega \cdot \tau > 1 \quad (1.3)$$

Parçacık ile atomlar arasındaki ortalama çarpışma süresi olan τ ile plazma salınım frekans ω ifadelerinin çarpımı Eş.1.3, birden büyük olmalıdır [11, 23, 24]. Yoğunluk ve sıcaklık yönünden en önemli plazma güneştir [25]. Aşağıdaki çizelgede önemli plazma parametreleri [8, 22, 26, 27, 28] yer almaktadır.

Çizelge 1.1. Doğadaki ve laboratuvar ortamındaki bazı plazmaların parametreleri

Plazma tipi	Parçacık yoğunluğu $n_e \text{ (m}^{-3}\text{)}$	Elektron sıcaklığı $T_e \text{ (eV)}$	Plazma boyutları $L \text{ (m)}$	Debye Uzunluğu $\lambda_D \text{ (m)}$	Plazma Frekansı $\nu_L \text{ (Hz)}$	L / λ_D
Yıldızlararası plazma	10^6	1	10^{16}	7,5	9×10^3	$1,3 \times 10^{15}$
İyonosfer	10^{11}	10^{-1}	10^5	$7,5 \times 10^{-3}$	3×10^6	$1,3 \times 10^7$
Gaz deşarjlar	10^{18}	2	10^{-2}	10^{-5}	9×10^9	1×10^3
Soğuk plazmalar	10^{18}	10^2	10^{-1}	$7,5 \times 10^{-5}$	9×10^9	$1,3 \times 10^3$
Füzyon reaktörü	10^{20}	10^4	2	$7,5 \times 10^{-5}$	9×10^{11}	3×10^4
Güneş koronası	10^{13}	10^2	10^8	2×10^{-2}	3×10^7	5×10^9
Elektrik ark	10^{22}	1	10^{-1}	$7,5 \times 10^{-8}$	9×10^{11}	$1,3 \times 10^6$
Endüstriyel plazmalar	10^{16}	10^{-5}	10^{-1}	$2,5 \times 10^{-4}$	9×10^8	4×10^2

Plazma frekansı

Plazmanın diğ er önemli özelliklerinden biri de makroskobik alanının y k n tralitesinin durağ an yapısıdır. Bir plazma denge durumundan ayrıldığı zaman başlangıçta sahip olduğu y k nötralizasyonunu yeniden sağlamak için kolektif parçacık hareketlerine neden olur. Bunlar plazma frekansı olarak bilinen dalgalanmanın doğal frekansı ile tasvir edilir. Başka bir deyişle E .1.4 ‘te Langmuir frekansı [22, 29] olarak bilinir.

$$\nu_L = \sqrt{\left(\frac{e^2 \cdot n_e}{m_e \cdot \epsilon_0}\right)} \quad \nu_L = 8.980 \sqrt{n_e} \text{ (Hz)} \quad (1.4)$$

Bu birlikte dalgalanmalar sık aralıklı olduğu için, ağır kötülere sahip olduklarından ötürü iyonlar elektron hareketini tam olarak takip edemezler. Elektron ağır iyonlar etrafında kolektif olarak dalgalanırken geri  ağırıcı kuvveti iyon elektron Coulomb  ekimi aracılığıyla sağlanmaktadır. Bu doğal dalgalanmanın süresi birleşik elektron hareketiyle karşılaştırıldığında anlamlı bir zaman aralığına sahiptir. Başta düzenli ve hareketsiz plazma içinde küçük bir yük ayrımı olduğunu varsayalım:

$$W_{pe} = \sqrt{\left(\frac{e^2 \cdot n_e}{m_e \cdot \epsilon_0}\right)} \quad (1.5)$$

$$W_{pe} = \sqrt{\left(\frac{z^2 \cdot e^2 \cdot n_i}{m_i \cdot \epsilon_0}\right)} \quad m_i \gg m_e \text{ olduğundan } W_{pi} \ll W_{pe} \quad (1.6)$$

Çizelge 1.2. Bazı metallerin plazma ve dalga boyları

Metal	Deėerlik	$W_{pe}(10^{16} \text{ Hz})$	$\lambda_{pe} \text{ (nm)}$
Bakır (Cu)	1	1,64	115
G�m�� (Ag)	1	1,36	138
Altın (Au)	1	1,37	138
Manganez (Mg)	2	1,65	114
Aluminyum (Al)	3	2,40	79

Basit metaller için plazma frekansı mor ötesi bölgededir. Ayrıca plazma frekansı, görünür bölgede metallerin neden çok iyi yansıtıcı olduklarını da açıklar. Alüminyum rengi görünür bölgedeki bütün ışığı yansıttığından beyazımsıdır. Altının, serbest elektronun yanı sıra bant arası geçişi (4 eV) civarında olduğundan sarımsı renkte görünür. Alüminyum ve gümüş yaygın olarak ışık yansıtma ayna olarak kullanılmaktadır. ($\lambda_{Al}=810\text{Å}$, $\lambda_{Na}=2170\text{Å}$). Elektronlar plazma frekansında osilasyon yaparlar. Aşağıda frekans tiplerine göre plazma tipleri verilmiştir [30].

Çizelge 1.3. Önemli gaz boşalma aralıklarında frekans değerleri

	$W_{pe} (\text{rad.s}^{-1})$	$W_{pi} (\text{rad.s}^{-1})$
Solar Korona	$5,6 \times 10^8$	$1,31 \times 10^7$
Tokamak	$1,8 \times 10^{11}$	$4,2 \times 10^9$
Manyetosfer	$5,6 \times 10^6$	$1,3 \times 10^5$

Çizelge 1.4. Frekans aralığına göre plazma tipleri

Plazma tipi	Frekans aralığı
Dc plazma	0 Hz
Düşük frekans plazması	$f < 1 \text{ MHz}$
Rf plazma	$1 < f < 500 \text{ MHz}$ çoğunlukla 13,56 MHz
Mikrodalga plazma	$0,5 < f < 10 \text{ GHz}$ çoğunlukla 2,45 GHz

Plazmaların oluşturulmasında kullanılan en etkili yöntem elektriksel deşarj metodudur. Elektrik alan sayesinde yük taşıyan parçacıklar ivmelendirilerek diğer nötr parçacıklar ile hızlı bir şekilde çarpıştırılması sağlanır [31].

Plazma yoğunluğu

Plazmanın içinde çok sayıda nötr ve yüklü parçacık vardır. Bunlar n_e , elektron yoğunluğu ve n_i , iyon yoğunluğu olarak ifade edilir. n_p , plazma yoğunluğudur [11].

Plazma iyonlaşması

Plazma içindeki yüklü parçacık sayısıdır. $\alpha_{iz} = 1$ ise plazma tamamen iyonlaşmıştır [20].

$$\alpha_{iz} = \frac{n_i}{n_i + N_a} \quad (1.7)$$

Mikro plazmalar

Çalışmamızda yer alacak olan bu kısım hakkında biraz daha bilgi vermek gerekir. Genellikle mikro plazma hücrelerinde ortam gazı olarak Ar (Argon), He (Helyum), O₂ (Oksijen), N₂ (Azot) vb. gazlar kullanılır. Biz çalışmamızda Ar (Argon) gazını ve verilerini kullandık. Çünkü Argon gazı ilgilenilen yerde güçlü bir yayılım özelliğine ve III-V grubu ve II-VI grubu yarı iletken malzemeler [32] ile kolay reaksiyona geçme özelliğine sahiptir. Mikro plazmalar için bazı önemli kriterleri açıklamalıyız. Bunlardan birisi ortalama serbest yoldur. Ortalama serbest yol (hız), çarpışmalardan önce gidilen ortalama mesafedir. 1 atm (760 torr) basınç altında hava ortamı için hesaplanan ortalama serbest yol 0.07 µm'dir. Eş. 1.7 parçacıkların çarpışma frekansı ortalama serbest yola sıkı sıkıya bağlıdır.

$$V = n_g \cdot 6_V \quad (1.8)$$

$$\lambda = \frac{1}{6_V \cdot n_g} \quad (1.9)$$

λ , ortalama serbest yol; 6_V , çarpışmaların tesir kesiti; n_g , birim hacimdeki gaz molekülleri sayısı; V , çarpışma frekansını simgelemektedir. n tane elektron d_x (kısmi) mesafesi içinde hareket ederken çarpışma nedeniyle başka bir d_n elektronu üretir. Bu nedenle;

$$d_n = a \cdot n \cdot d_x \quad (1.10)$$

$$\frac{dn}{n} = a \cdot d_x \quad (1.11)$$

$$\ln(n) = a \cdot x + A \quad (1.12)$$

$x = 0$; $n = n_0$ için Eş. 1.13 oluşur.

$$\ln(n_0) = A \quad (1.13)$$

Elde edilen ifadeler Eş. 1.12' de yerine yazılırsa Eş. 1.14 elde edilir.

$$\ln(n) = a \cdot x + \ln(n_0) \quad (1.14)$$

Eş. 1.14 'te $\ln(n)$ ve $\ln(n_0)$ ifadeleri tek tarafa toplanırsa Eş. 1.15 elde edilir.

$$\ln \frac{n}{n_0} = a \cdot x \quad (1.15)$$

$$n = n_0 \cdot e^{a \cdot x} \quad (1.16)$$

Kararlı halde; katoda gelen pozitif iyon sayısı, anoda gelen yeni oluşan elektron sayısına eşit olmalıdır. Böylece devre akımı;

$$I = I_0 \cdot e^{a \cdot x} \quad \text{veya} \quad I = I_0 \cdot e^{a \cdot d} \quad (1.17)$$

Townsend (V_T) verimli ikincil iyonizasyon ve ortak pozitif iyon salınan elektron sayısı ise;

$$n_+ = V_T \cdot [n - (n_0 + n_+)] \quad (1.18)$$

$$n_+ = V_T \cdot n - V_T \cdot n_0 - V_T \cdot n_+ \rightarrow (1 + V_T) \cdot n_+ = V_T \cdot (n - n_0) \quad (1.19)$$

$$n_+ = \frac{V_T \cdot (n - n_0)}{1 + V_T} \quad (1.20)$$

$$n = (n_0 + n_+) \cdot e^{a \cdot d} \quad (1.21)$$

Eş. 1.21 içerisine Eş. 1.20 uygun şekilde yerleştirilip devam edilirse;

$$n \cdot [1 - V_T \cdot (e^{a \cdot d} - 1)] = n_0 \cdot e^{a \cdot d} \quad (1.22)$$

Akımlar yönünden;

$$I \cdot [1 - V_T \cdot (e^{a \cdot d} - 1)] = I_0 \cdot e^{a \cdot d} \quad (1.23)$$

Geleneksel olarak mikroskobik plazmalardaki elektron enerji dağılımı için; Maxwell Boltzman dağılımı kullanılır [33]. Gerçek parçacıklar bir hız dağılımına sahipse tesir kesiti parçacığın hızına ve etkileşenlerine kuvvetlice bağlıdır. Bu dağılım;

$$\frac{dn}{dc} = \left(\frac{4n}{\sqrt{\pi}}\right) \cdot \sqrt{\frac{m}{2kT}} \cdot c^2 \cdot e^{\left(\frac{-mc^2}{2kT}\right)} \quad (1.24)$$

Kütle korunum denklemleri

İçi gaz dolu tüp için üç türde korunum denklemi tanımlanmıştır. Bunlar iyonlar, elektronlar ve nötrler için korunum denklemleridir.

İyonlar

İyon sürekliliği ve elektrik alan kuvveti dikkate alındığında;

$$\frac{\partial}{\partial t}(n_i) = 0 = S_i - \nabla \cdot J_i \quad (1.25)$$

Bu model ICP (indüktif olarak eşleşmiş plazma) durumu için kullanılır. Manyetik alan yoğunluğu düşük basınçlarda genellikle azdır bu nedenle göz ardı edilmiştir. Reaksiyon iyon sayısı yoğunluğu katsayısı S_i şöyle belirlenir:

$$S_i = \sum_{j,k} K_{j,k} \cdot (T_e) \cdot (n_j \cdot n_k) \quad (1.26)$$

$$J_i = D_j \nabla n_i + z_i \cdot \mu_i \cdot n_i \cdot E_s \quad (1.27)$$

$$D_i = \frac{k \cdot T_i}{m_i \cdot V_{in}} \quad (1.28)$$

$$\mu_i = \frac{e}{m_i \cdot V_{in}} \quad (1.29)$$

$$V_{in} = 6_{in} \cdot V_i \cdot N \quad (1.30)$$

Bohm akısı negatif iyon akısı sıfır iken ICP (indüktif olarak eşleşmiş plazma) modelde;

$$J_{i_bc} = n_i \cdot u_{B_i} \cdot n = n_i \cdot \sqrt{\left(\frac{k \cdot T_e}{m_i}\right)} \cdot N \quad (1.31)$$

Elektron için yarı nötrlük

Plazma modelinde sıklıkla süreklilik-sürüklenme difüzyon denklemleri [34, 35, 36] kullanılır. Boltzman dağılım denkleminin elektronötrlük varsayımı Eş. 1.32 alınarak model basite indirgenir.

$$E_s = \frac{-k}{q \cdot n_e} \cdot \nabla(n_e \cdot T_e) \quad (1.32)$$

Nötrler

Yüksek kimyasal olaylara ve enerji seviyelerine sahip nötrler elektrik yükünden yoksundurlar, bundan dolayı elektromanyetik güçten tamamen etkilenmezler.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = 0 = S_n - \nabla(-D_n \cdot \nabla n_n + u_n \cdot n_n) \quad (1.33)$$

Elektron enerji denklemleri

Elektron enerji denge denklemi aşağıdaki şekilde tanımlanır ve bu formülde ikinci denklem toplam elektron enerjisi akısının ölçüsüdür. Üçüncü denklem joule ısınmasıdır. Beşinci ve altıncı denklemler elastik/esnek olmayan çarpışmalardaki enerji kaybıdır.

$$\frac{\partial y}{\partial t} \left(\frac{3}{2} \cdot n_e \cdot k \cdot T_e \right) + \nabla \cdot q_e + e \cdot J_e \cdot E - P_{ind} + 3 \cdot \left(\frac{m_e}{M} \right) \cdot n_e \cdot k \cdot V_m \cdot (T_e - T_g) + n_e \cdot \sum_j K_j \cdot T_e \cdot \epsilon_j \quad (1.34)$$

Toplam elektron enerji akışı şu şekilde oluşur;

$$q_e = \frac{5}{2} \cdot T_e \cdot J_e \cdot k - K_e \nabla T_e \quad (1.35)$$

$$K_e = 3 \cdot k \cdot n_e \cdot \frac{D_e}{2} \quad (1.36)$$

$$J_e = \sum_{i \neq e} J_i \quad (1.37)$$

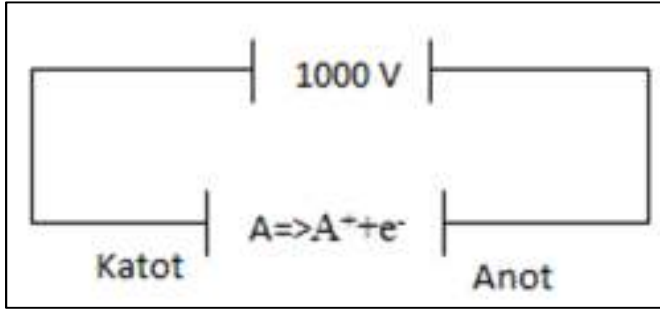
Navier -Stokes denklemleri (nötr arka plan gazı için)

Navier -Stokes denklemi [37] şöyle oluşur:

$$\rho \cdot \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \nabla \cdot \eta \cdot (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) + \rho \cdot \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} + \nabla p = \mathbf{F} \quad (1.38)$$

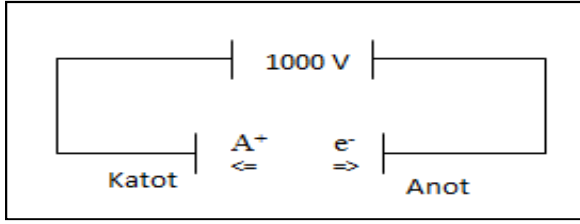
$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1.39)$$

Çarpışmalar



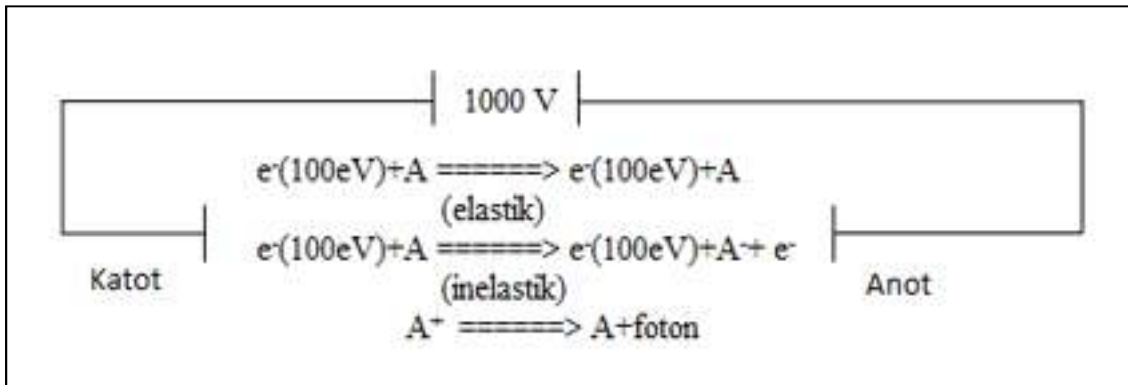
Şekil 1.5. Çarpışma sonrasında atomun elektron ve iyonla ayrılması (A: Atom)

Bir potansiyel uygulandığında çok az sayıda gaz molekülleri oda sıcaklığında harekete geçer. Dış bir etki (radyasyon, foton, çarpışma) ile bir elektron bir molekülden ayrılabilir. Elektrotlar arasına yüksek bir voltaj uygulandığında elektronlar anoda doğru hızlanırlar. Kinetik enerji sıcaklıkla ilişkili olduğundan sıcak elektronlar düşük kütlelerinden dolayı yüksek sıcaklığa doğru hareket ederler. Ağır gaz molekülleri yavaş yavaş hareket ederler. Bazı elektronlar iki enerji seviyesi arasında kalır. Hidrojen atomu gibi davranır. Etrafında başka bir elektron dolaşarak sahte bir atom oluşturur. Buna hat elektron denir. Gaz molekülleri esnek ve esnek olmayan çarpışma yaparlar.



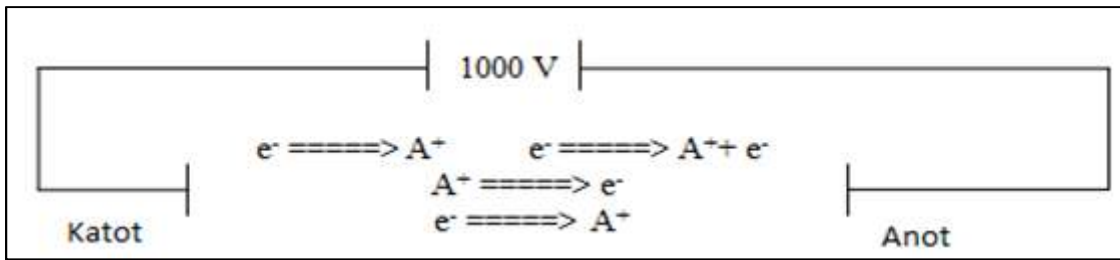
Şekil 1.6. Atom ve iyonun katot ve anot plakalarına yönelmesi

Esnek çarpışmalar elektron ve molekül kütle farkından dolayı elektron enerjisinin küçük bir kısmını tüketir. Esnek olmayan çarpışmada gaz molekülleri uyarılır veya tamamen elektronu uyararak onları iyonize eder.



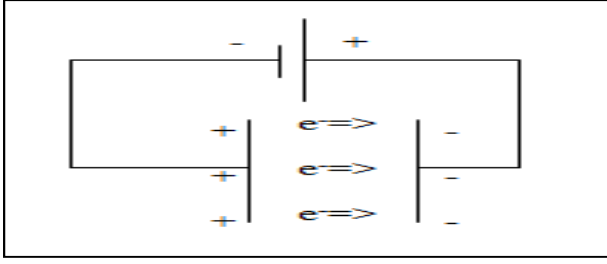
Şekil 1. 7. Plakalar arasında çarpışmalar

Esnek veya esnek olmayan çarpışmalarda üretken elektronlar anoda doğru hızlanmalıdır.



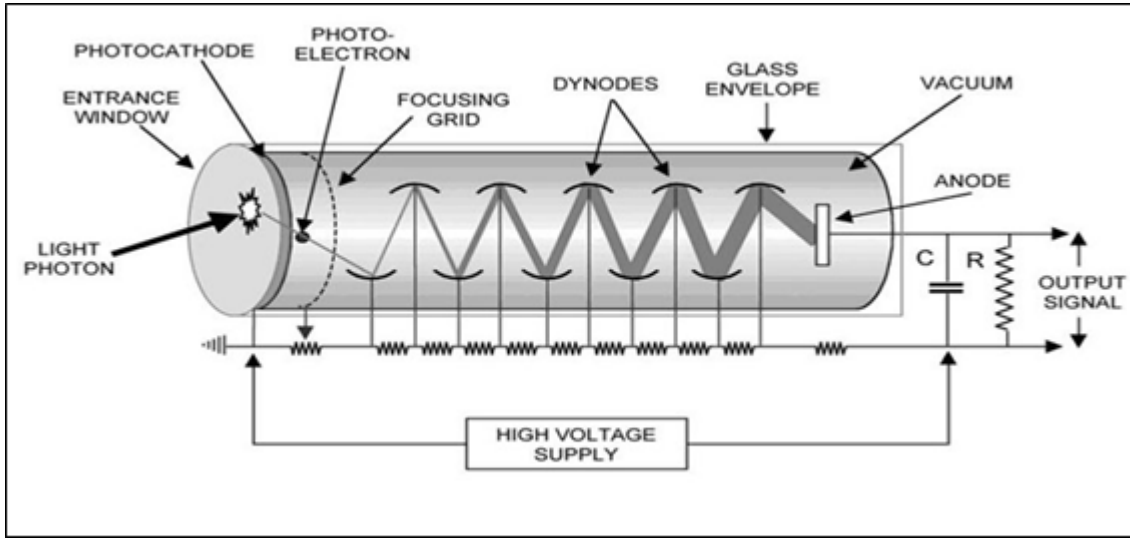
Şekil 1.8. Atomdan iyona; iyondan atoma doğru yönelim

Anoda doğru hızlanan elektronlar zincirleme iyonizasyon mekanizması olan impact iyonizasyonu oluştururlar. Potansiyel fark veya foton olmazsa dahi bir süre kendi kendisini devam ettirir. Bu süreç sanki bölünerek hücre çoğalmasına benzetebiliriz. Bir elektron iki elektrona; iki elektron dört elektrona; dört elektron sekiz elektrona şeklinde devam etmektedir.



Şekil 1.9. Pozitif ve negatif yüklerin anot-katot yönelimleri

Herhangi bir voltaj uygulandığında (katot-anot arası) pozitif yükler elektrona göre daha yavaş hareket ederler. Bu nedenle pozitif yükler katot civarında birikirler. Bu pozitif yükler katot materyali ile etkileşerek bir potansiyel düşüşe neden olurlar. Bunun sonucunda da katottan ikincil elektron emisyonuna yol açarlar. Bunlara secondary (ikincil) emission (emisyon) denir. İkincil elektronlar ile zayıf elektrik akımları güçlendirme için kullanılan fotoçoğaltıcı (fotomultiplier) tüpler geliştirilmiştir.



Şekil 1.10. Photomultiplier (fotoçoğaltıcı) düzenek görüntüsü

Elektrik alanda enerji kazanan bir elektron, iyonizasyon potansiyelinden daha büyük bir enerjiye sahip olduğunda gaz atomlarıyla çarpışmalar yapar. Bu elektron enerjisini kaybederek gaz atomlarını iyonlaştırır. Bu olayın sonucunda iki yavaş elektron meydana gelir. Bu elektronlar elektrik alanda tekrar hızlandırılırlar, atomları iyonlaştırırlar, dört elektron üretirler.

Bir plazma hücresi içerisinde yer alan argon gazının reaksiyon ve çarpışması aşağıda gösterilmiştir [38].

Çizelge 1.5. Gaz boşalma tüpünde gerçekleşen çarpışma ve reaksiyon tipleri

Reaksiyon Sayısı	Çarpışmalar	Çarpışma Çeşidi	$\Delta e(eV)$	Kullanılan Sabit
1	$e+Ar \Rightarrow e+Ar$	Elastik	0	Boltzman
2	$e+Ar \Rightarrow e+Ar^+$	Uyarma	11,5	Boltzman
3	$e+Ar \Rightarrow e+Ar^+$	Süper elastik	-11,5	Boltzman
4	$e+Ar \Rightarrow 2e+Ar^+$	İyonizasyon	15,8	Boltzman
5	$e+Ar \Rightarrow 2e+Ar^+$	İyonizasyon	4,24	Boltzman
6	$Ar+Ar \Rightarrow e+Ar+Ar^+$	Penning iyonizasyonu	-	$6,2 \times 10^{-10} \text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
7	$Ar+Ar \Rightarrow Ar+Ar$	Stabil sönmleme	-	$1 \times 10^7 \text{s}^{-1}$

Bir gaz boşalmasında pek çok tipte çarpışma gözlemlenir. En yaygın olan esnek (elastik) çarpışmalardır. Bu çarpışma bir elektronun bir nötral atomdan rutin saçılması ya da nötral-nötral çarpışmalardır. Diğer tüm çarpışmalar esnek olmayan türdendir. Kütleleri m_i , m_t olan iki parçacık arasında esnek çarpışma Eş. 1.40 gerçekleştiğinde lineer momentumun korunumundan;

$$m_i \cdot v_i \cdot \cos \theta = m_i \cdot v_i + m_t \cdot v_t \quad (1.40)$$

Elde edilmektedir. Fakat elektron popülasyonu yavaş ve hızlı olmak üzere iki çeşittir. Hızlı elektronlar, katotun yakınında olan elektronlardır. Yavaş elektronlar, iyonizasyon etkisi sonucu ortaya çıkan elektronlardır. Katot bölgesindeki potansiyel düşüşüyle kısmen ivmelendirilirler. Bunların akım-enerji dağılımı yüksek parlaklıkta olan negatif glow bölgesinde gaz atomlarını uyaracak kadar yük-akı-enerji dağılımına sahiptirler.

Hızlı elektron enerjilerinin ilk çarpışma sonucunda, iyonizasyona neden olacak şekilde harcarlar. Ancak pozitif glow düşük potansiyel gradyentinden dolayı yeterli enerji kazanamazlar. İyonizasyon boyunca enerji kayıpları ve kısmi ivmelenme pozitif glow içerisinde şeritli yapıya neden olur. Glow boşalması global olarak nötraldir. Fakat net pozitif-negatif bölgeleri barındırırlar.

Esnek olmayan (inelastik) çarpışmalar, gaz boşalmasındaki esnek olmayan çarpışmalardır. Esnek olmayan çarpışmada atom uyarılmış bir duruma geçiş yapar. Sistemin kinetik enerjisinde azalma olur. Atom enerji düzeyleri kuantumlanmış olduğundan, elektronun kaybettiği enerji de kesikli değerler olacaktır. Yani elektron $E_n - E_1$ farkına eşit miktarda enerji kaybeder. Burada E_1 taban durumu, E_n ise n. uyarılmış durumdur. Örneğin ilk uyarılmış durum için gerekli enerji $E_2 - E_1$ 'dir. Elektronun ilk kinetik enerjisi bu farktan küçük ise atomu uyaramaz ve sadece esnek çarpışma yapabilir. Böylece değişik kinetik enerjilerde gönderilen elektronlar ve yaratılan akımlar hızlandırma potansiyelleri incelenerek atomun enerji düzeylerindeki süreksizlik incelenebilir. Excitation (uyarma) [39, 40], ionization (iyonizasyon) şeklinde esnek olmayan çarpışma evreleri gerçekleşir.

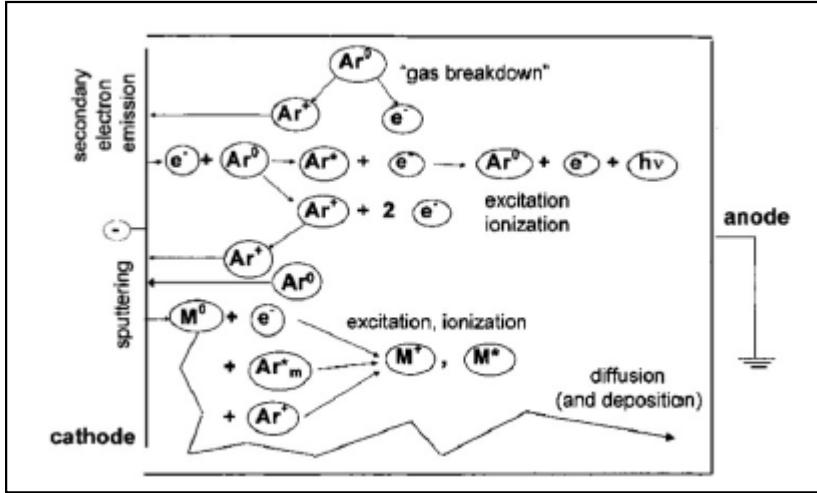
Excitation (uyarma), bir atom veya molekül ona ait elektronun bir üst enerji seviyesine geçmesine yetecek kadar enerjisi olduğunda atom veya molekülün uyarılması gerçekleşmiş olur. Uyarma süreci bir fotonun bir elektron tarafından soğrulmasında veya atomla çarpışmasından meydana gelebilir. Fotonla uyarmada olasılık kurallarına bağlıdır. Uyarma sadece fotonun enerjisi seviyeler arası enerji farkının yakında rezonans uyarma meydana gelir. Radyasyonun plazma içinde tuzaklanmasına yol açar.



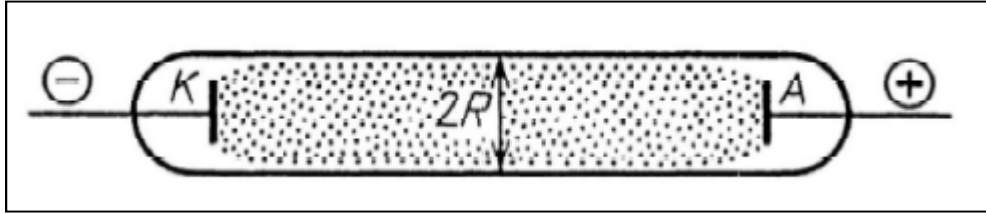
Uyarma ve relaxasyon çarpışmaları foton üretir. Elektron çarpışması ile uyarma elektron enerjisi (eV) aştığı zaman meydana gelir. Bir iyon veya atom çarpışması ile uyarma olur. İyonizasyon bir atom ya da iyon elektronun serbest kalmasına yetecek kadar enerjiye sahipse atom ya da molekül iyonlaşmıştır. Bu süreç bir fotonun soğrulması veya elektron ve iyon çarpışmalarıyla gerçekleşebilir. Bu boşalmayı besleyen en önemli çarpışma iyonlayıcı çarpışmadır. Bir anda birincil elektron atomdan bir atom koparır.



Öyle ki elektron çarpışması ile iyonizasyon çarpan elektronun enerjisi atomun iyonizasyon potansiyelinden yüksekse olur. Bu durumda serbest kalan elektronun daha fazla iyonizasyon oluşturacak ve gaz boşalmasını devam ettirecek şekilde devam ettirir.



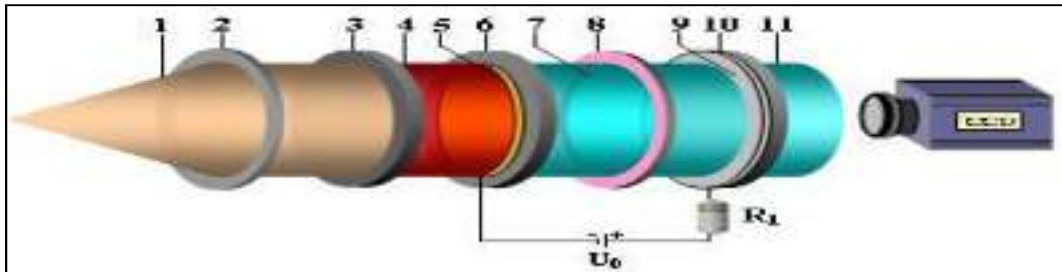
Şekil 1.11. Gaz boşalma reaksiyonları



Şekil 1.12. Boşalma tüp örneği (K: Katot, A: Anot)

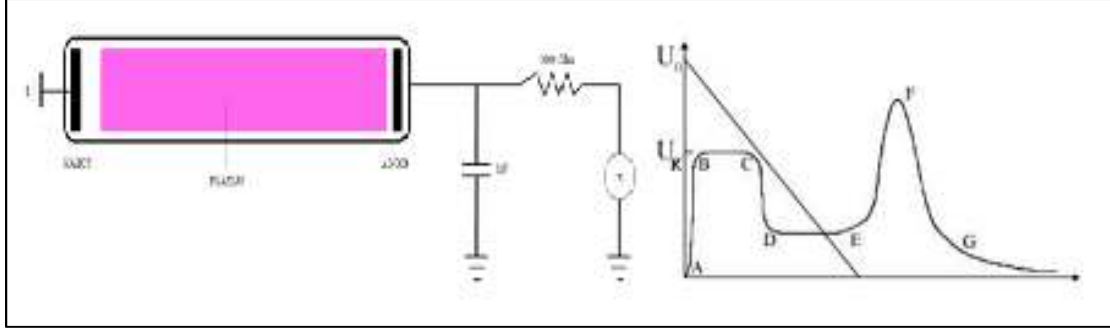
Gaz boşalma tüp hücresi [41] ve hücre içerisinde meydana gelen kimyasal reaksiyonlar [42] yukarıdaki şekillerde yer verilmiştir.

Yarıiletken gaz boşalma hücresinin (MGBH) [6, 43, 44] kullandığımız COMSOL Multiphysics programında ki basit görüntüsü aşağıda verilmiştir.



Şekil 1.13. Mikro elektronik gaz boşalma hücresi (MGBH)

Yarıiletken gaz boşalma hücresi (MGBH) görüntüsünde 1, gelen ışık demeti; 2, mercek; 3, Si filtre; 4, IR ışık demeti; 5, yarı geçirgen Au tabaka; 6, yarıiletken materyal; 7, gaz boşalma aralığı; 8, mika yaprak; 9, saydam iletken SnO_2 kontak; 10, düzlemsel cam disk; 11, UV görünür ışık demeti olarak verilmiştir.



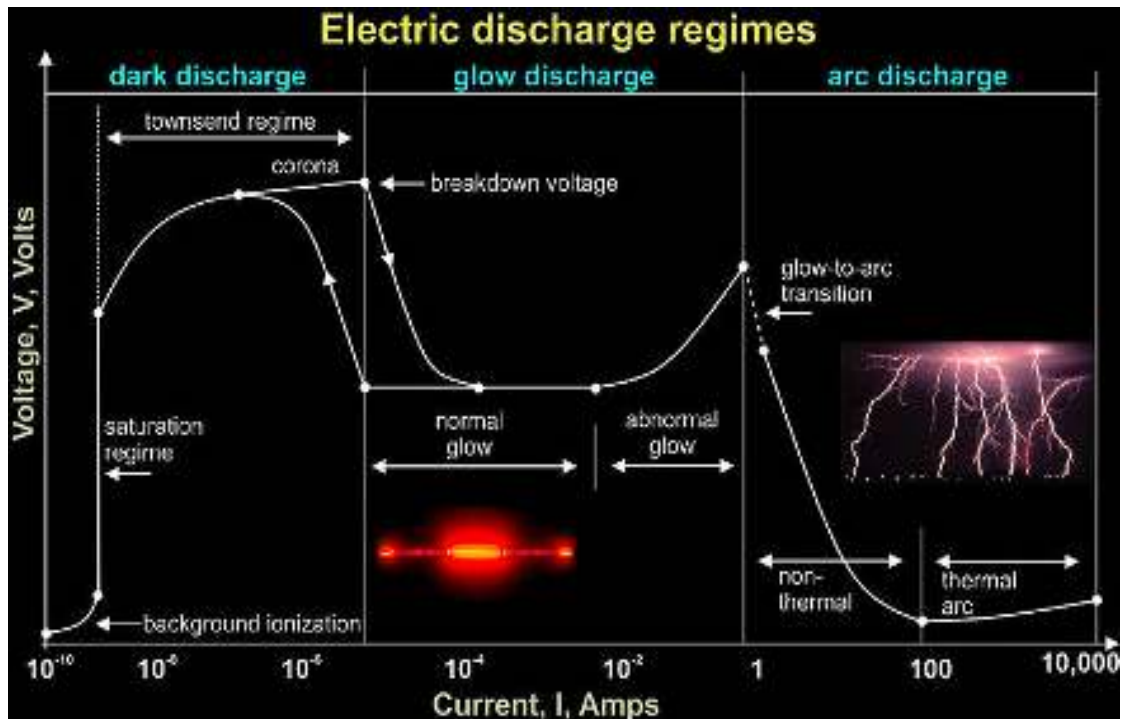
Şekil 1.14. Gaz boşalma devresi temel görünümü ve I-U (I-V) karakteristiği

A-B: Zemin İyonizasyonu, B-C: Townsend Boşalması (10^{-10} A- 10^{-5} A)

C-D: Normal-Altı Glow Boşalması, D-E: Glow Boşalması (10^{-5} A- 10^{-1} A)

E-F: Normal-Üstü Glow Boşalması, F-G: Ark Boşalması (10^{-1} A- 10^4 A)

DC gaz boşalımı



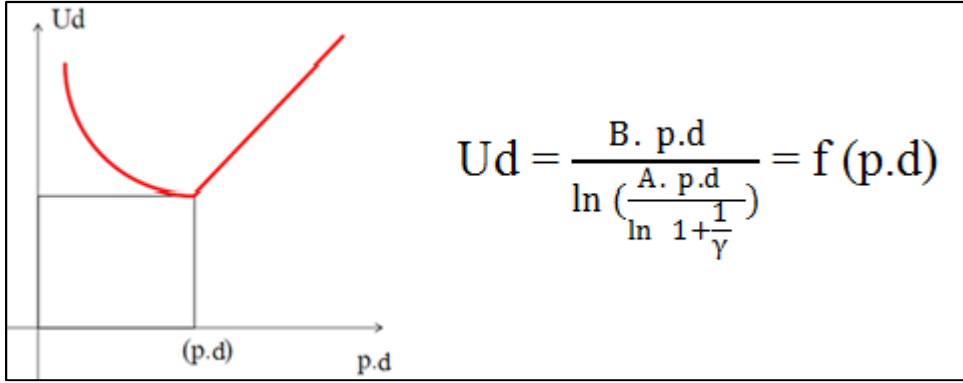
Şekil 1.15. Dc gaz boşalma esnasında oluşan bölgeler

Karanlık bölge

Akım voltaj karakteristiğindeki 10^{-10} A ile 10^{-5} amper bölge karanlık boşalma olarak isimlendirilir. 10^{-9} ile 10^{-5} arasında kalan kısım townsend oluşumudur. Karanlık bölgede 10^{-10} amper ile 10^{-9} amper aralığı sürecin zemin iyonizasyon safhasıdır. Bu safhada sisteme entegre edilen elektrik alan, iyonizasyon sonucu oluşan elektronlar ve iyon parçacıklarını harekete geçirir. Uygulanan elektrik alan içinde elektronlar ve iyon parçacıkları zayıf akımlar neticesinde sistem içindeki elektrotlara doğru sürüklenirler. Elektrotlar arasındaki voltaj(V) yeterince arttırılırsa, akım(A) doyuma ulaşır. Burada rekombinasyon (yok olma) hızı iyonizasyon hızına eşittir. Doyumda voltaj (V) artmasına rağmen akım stabil kalır. Uygulanan voltaj daha da arttırılırsa, akım(A) exponansiyel şekilde artacak ve elektronlar nötr bir atomu iyonlaştırmak için yeterli enerjiye kavuşmuş olacaktır. Voltaj daha da arttırılırsa elektrik alan daha da kuvvetli olacak, böylece ikincil bir elektronda elektron ve iyon parçacık üretiminde çığ oluşacaktır. Akımın exponansiyel olarak arttığı ve akım değerlerinin 10^{-9} A ile 10^{-5} A olduğu bu kısım Townsend boşalması olarak adlandırılır. Bu bölgede elektrik alan homojendir. Uzay yükleri (Space discharge) yok denecek kadar azdır. Yüksek elektrik alan bölgelerinde, Townsend karanlık boşalmalarında meydana gelen korona boşalmaları, eğer akım çok yüksekse teknik olarak gözle görebilme imkanı sunar. Düşük akım değerlerinde koronal boşalmalar karanlıktır. UK kırılma voltajı sistem içinde yer alan elektrotlara bağlanan güç kaynağının iç direncine bağlıdır. Eğer iç direnç çok büyükse, tüp içindeki gazın tepkimeye girmesi için yeterli akım gelmez. Gaz korona boşalmalarında kalır. Eğer iç direnç çok küçükse, gaz UK kırılma voltajında kırılmaya uğrar. Glow moduna geçiş başlayacaktır.

Glow boşalması

Belli gaz ve elektrotlar arasındaki kırılma voltajı Paschen kanununa bağlıdır. Gaz kırılması bir eşik sürecidir. Paschen, U_d kırılma voltajının p.d fonksiyonu olduğunu bulmuştur. U_d kırılma voltajının p.d çarpımına bağlı olması Paschen Kanunu olarak bilinmektedir. Paschen kanunu; $U_d = f(p.d)$ olur [45, 46, 47]. Voltaj akımdan hemen hemen bağımsızdır. Breakdown, gazın yalıtkan halden iletken hale geçtiği kritik haldir [47].



Şekil 1.16. Paschen eğrisi ve denklemi

Breakdown voltajının değeri; Gazın basıncına, gazın cinsine, uygulanan voltaja, katot materyalinin cinsine, katot çapına, katot şekline, katot üzerine düşen ışığın şiddetine, elektrotlar arası mesafeye (E_{gap}) bağlıdır. 10^{-5} A ile 1 A arası bölge Glow boşalmasının gerçekleştiği kısımdır. Bu alanda Townsend boşalmasında daha parlak bir ışık yayınımlı olmaktadır. Bu esnada bir potansiyel düşüş gözlenir. Bunun nedeni katot duvarında biriken pozitif uzay yükleridir. Glow bölgesinde elektrik alan ve akım yoğunluğu düzensizdir (homojen değildir). Townsend ile karşılaştırılırsa Glow boşalmasında daha parlak ve şiddetli ışığa görünür [48, 49, 50].

Korona boşalması

Bu boşalım seri halde meydana gelen boşalmalardan oluşur. Tam bir plazma değildir. İyonlaşma etkisiyle oluşan iyon ve elektronlardan oluşmaktadır [51, 52].

Ark boşalması

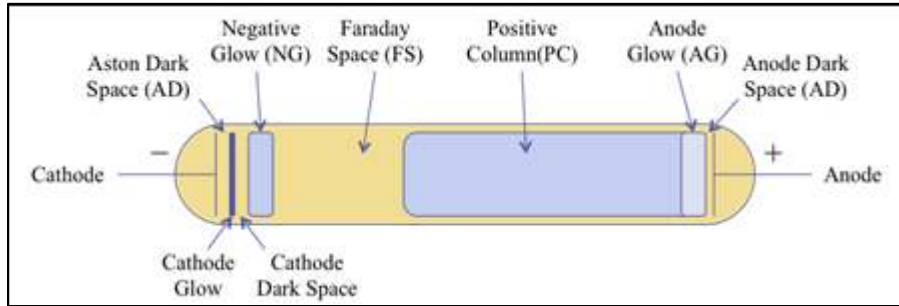
1A ile 10.000 A arasındaki bölgedir. Yaklaşık 1A değerinde elektrotlar çok sıcaktır. Eğer Dc güç kaynağı yeterince düşük iç dirence sahipse, boşalma Glow-ark geçince uğrar. Boşalma voltajı burada akım arttıkça azalır ve bu süreç büyük akımlara ulaşıncaya kadar devam eder. Bu noktadan sonra voltaj, akımla birlikte yavaş yavaş artar. Bu bölgede filament (homojen olmayan akım yoğunluğu) denilen bölgeler oluşur. Bu bölgede enerji değeri o kadar yüksektir ki katot materyaline zarar verebilir. Materyal üzerinde oksit birikme oluşur. Bu oksit tabakasının varlığı gazın yalıtkan halden iletken hale geçtiği breakdown kırılma voltajının değişimine etki etmektedir.

Dc gaz boşalması basit ve çok kolay tekrarlanabilen bir plazma sistemidir. Genellikle uzun silindirik bardağa benzeyen içerisine gaz doldurulmuş bir tarafı anot ve bir tarafı katot olacak şekilde oluşturulmuş ve dış çeperi yalıtkan malzemeyle kaplanmış sistemdir. İki elektrot arasında gaz doldurularak Dc bir voltaj uygulanmasıyla plazma oluşturulur.

Bu nedenle Townsend ve Glow boşalma bölgelerinde çalışmak hem temiz veriler almamızı hem de oluşacak görüntü işlemlerinin düzgün çıkmasını sağlayacaktır.

Aston Dark Space, güçlü elektrik alana sahip ince bir bölgedir. Negatif bir uzay yüküne sahiptir. Elektron yoğunluğu o kadar küçüktür ki gazı uyarmak için yeterli değildir. Katot elektriksel olarak iletken olan bir metal yapıdadır. Katot yüzeyinin pozitif iyonlarla bombardıman edilmesi sonucunda katottan elektron yayınlanır. Buna ikincil elektron yayını denir. Katot ve anot arasındaki potansiyel fark genel olarak eşit dağılmaz. Katodun hemen yanındaki bölge birincil karanlık bölge ya da aston karanlık bölgesidir. Bu bölge kuvvetli bir elektrik alana ve negatif uzay yüküne sahiptir. İkincil elektronun birikmesiyle katotta Aston karanlık uzayı veya birincil karanlık uzayı oluşur. Katottan hızlandırılma aşamaları olduğunda yavaş elektronların birikmesi oluşarak bu bölgede negatif bir yüzey yüklenmesi ve güçlü bir elektrik alan oluşur.

Dc Glow boşalma tüpünde boşalma esnasında oluşan bölgeler aşağıda açık bir şekilde verilmiştir.



Şekil 1.17. Gaz boşalma esnasında tüpte oluşan bölgeler

Katot Glow, katot yüzeyinden sökülen uyarılmış atomların oluşturduğu etki bölgesidir. Pozitif iyonlardan dolayı yüksek iyon yoğunlukludur. Renk olarak turuncu renktedir. Burada, ikincil elektronlar katottan çok yüksek hızlarda salınır yani yüksek ivmeye sahiptirler. Bu yüksek enerjili elektronlar katottan belirli bir mesafede (bu ortalama serbest yola karşılık gelir) ve sonuç olarak katot glow oluştururlar.

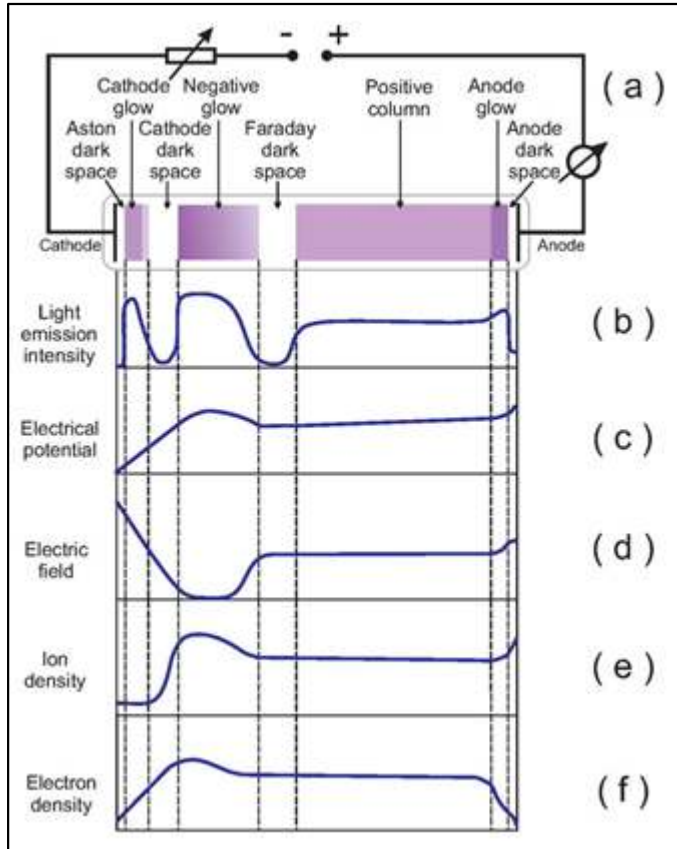
Yayınlanan ışımının rengi hem katot materyaline hem de çalışma gazına bağlıdır. Katot glow eksenel boyu gaz basıncı ve gazın doğasına bağlıdır.

Katot Dark Space, katot düşüşü olarak bilinir. Elektronlar bu bölgede hız kazandırılır. Paschen minimum [45, 46] ile belirlenen eksensel uzunluktur. Katot glow elektrik alanının orta büyüklükte, uzay yükünün pozitif ve oldukça yüksek yoğunluklu olduğu katot karanlık uzayı (cathode dark space) tarafından takip edilir. Bu karanlık alanda pozitif iyonlar katoda karşı hızlandırılır. İyonların mobilitesi elektronlarınkinden küçük olduğu için bu karanlık bölge daha çok iyonlardan oluşur.

Negatif Glow, ivmelendirilen elektronlar iyonizasyon ile şiddetli uyarıma neden olur. Bundan ötürü şiddetli ışın yayınımlı gerçekleşir. Gözlemler ve deneyler aşamasında sarı bir renktedir. Tipik elektron yoğunluğu 10^{16}e/m^3 olur. Negatif glow tüm alanı boyunca en parlak ışımaya şiddetine sahip olan bölgedir. Bu bölgede iyonizasyon ve uyarıma çarpışmalarına yol açar. Burada elektrik alanı oldukça düşüktür ve akım neredeyse tamamen elektron tarafından üretilir.

Çizelge 1.6. Dc boşalmada aydınlanma bölge renk oluşumları

Gaz	Katot Sınırı	Negatif Glow	Pozitif Column
Argon	Pembe	Koyu Mavi	Koyu Kırmızı
Hava	Pembe	Mavi	Kırmızı/Sarı
Helyum	Kırmızı	Pembe	Kırmızı/ Pembe
H ₂	Kırmızı/Kahverengi	Soluk Mavi	Pembe
N ₂	Pembe	Mavi	Kırmızı/Sarı
O ₂	Kırmızı	Sarımsı/Beyaz	Soluk sarı/Pembe
Neon	Sarı	Turuncu	Kırmızı/Kahverengi



Şekil 1.18. Dc boşalmada bölgelerde oluşan grafiksel oluşumlar

Dc boşalma bölgesinde (a) elektrik devresi ve deşarj bölgeleri, (b) ışık yayma yoğunluğu dağılımı, (c) elektrik potansiyeli, (d) elektrik alanı, (e) pozitif iyon yoğunluğu ve (f) elektron yoğunluğu [32, 53, 54, 55] olarak verilmiştir.

Faraday Space, iyonizasyon ve uyarım nedeniyle düşük elektron enerjili bölgedir. Rekombinasyon ve difüzyon nedeniyle elektron yoğunluğu azdır.

Pozitif Glow, quasi-nötral (nötral gibi/nötrale yakın) plazma bölgesidir. Küçük elektrik alanına sahiptir. Elektron yoğunluğu $10^{15} - 10^{16} \frac{e}{m^3}$ olur. Uzun homojen ışıma gerçekleşir. Sıcaklıkta (-2) eV değişim gözlemlenir. Pozitif glowdaki elektronların sürüklenme hızı düşüktür çünkü elektrik alan zayıftır ve tipik olarak elektronların termal hızından azdır.

Anod Glow, anot sınırında yer alan parlak bölgedir. Anot karanlık bölgesi, pozitif bölgeden anoda akan elektronlar nedeniyle negatif uzay yüke sahiptir. Anot yakınında elektronlar çekilir ve hızlandırılır ancak iyonlar itilir. Yüksek elektrik alanına sahip negatif uzay yüklerinin olduğu bölgedir. Negatif bölgelerin boyu (uzunluk) kullanılan gazın basıncına, kullanılan katot materyalin yüzey alanına ve katot materyalinin cinsine bağlıdır.

2. TEORİK KISIM

2.1. Comsol Multiphysics

Mikro ve makro plazma hücreleri ile çalışmak için kendi içerisinde modüllere sahip en çok tercih edilen analiz programlarından biri olan Comsol Multiphysics deneysel ve teorik çalışanlarca tercih edilen bir programdır. Deneylerin kısa zamanda simülasyon edilmesi ve maddi açıdan düşük olması, hızlı ve pratik olması programın avantajlarından. Birçok yan yazılımı java, C++, Matlab, Solidworks gibi çizim ve kodlama programlarını desteklemesi yapılacak birçok proje, ödev, simülasyona çözüm ve imkan sağlamıştır. COMSOL Multiphysics içerdiği birçok modül ve modül içindeki denklemler ve çözüm metotları kolaylık sağlar. Dc glow bölgesinde çalıştığımız için bizde burada plazma ve Dc modül kullandık. Plazma siteminde farklı yarı iletken malzemeler katot malzemesi olarak kullanılmıştır. SnO_2 kaplı cam plaka, anot tarafında kullanılmıştır. Elektron mobilitesi, uygulama voltajı, iş fonksiyonu, gaz basıncı değerleri girilmiştir. Veri girişinden sonra programa deneyde kullanılacak geometri, gaz cinsi ve gazın verileri, kullanılacak katot materyallerinin eklenmesi ve yine kullanılacak modül eklenmesi yapılmıştır. Çözüm ve zaman aralık değerleri girilerek plazma oluşumu sağlanmıştır. Comsol Multiphysics programında plazma oluşumu için aşama aşama bölümleri açıklayalım.

2.1.1. Geometri bölümü

Bu bölümde programımızda yer alan veya bireysel (el ile) olarak çizilebileceği Comsol graph ekranında deneyde kullanacağımız formun tasarımının yapıldığı yerdir. 1D, 2D, 3D boyutlu çizimleri yapılabildiği kısımdır.

2.1.2. Plazma bölümü

Bu bölümde kullanılacak gazın her bir reaksiyonunun tanımlandığı dosyaları sistemimize tanıtarak plazma sistemimizde oluşturulan kontakt yapılar, topraklamanın yapıldığı yer, yalıtkan yapılması gereken yüzeyler tanımlanır. Tanımlanan gaza göre bütün reaksiyon aşamaları, reaksiyon sırasında oluşan her bir atom, iyon veya elektron sistem içerisinde tanımlanır.

Burada reaksiyon sırasında oluşan her bir elektronun enerjisinin zamana bağlı olarak değişimi gösterilir. Ayrıca ortalama enerjisine bağlı olarak Townsend katsayısının değişim verileri de burada tanımlanır. Reaksiyonların tersinmez veya tersinir olması tanımlanır. Bu bölgede sistemimiz için gerekli topraklama değerleri, anot, katot kısımlar, plazma sisteminin duvarları, elektriksel potansiyel değerleri, yalıtkan kısımlar sistemimizde tanımlanır. Tanımlanan bu gaz yapısının hangi geometrik yapı içerisinde yer alacağı sisteme tanıtılır [56, 57]. Plazma oluşumu için en dikkat edilmesi ve özen gösterilmesi gereken kısım plazma bölümüdür.

Plazma domain denklemleri

Elektron yoğunluğu ve ortalama elektron enerjisi hesabı, bir çift sürüklenme difüzyonu çözülerek hesaplanır.

$$\frac{\partial(n_e)}{\partial t} + \nabla \cdot [n_e \cdot \mu_e \cdot E - D_e \cdot \nabla n_e] = R_e \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(n_\epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot [-n_\epsilon \cdot \mu_\epsilon \cdot E - D_\epsilon \cdot \nabla n_\epsilon] + E \cdot \Gamma_\epsilon = R_\epsilon \quad (2.2)$$

$$\Gamma_\epsilon = -(\mu_\epsilon \cdot E) \cdot n_e - D_e \cdot \nabla n_e \quad (2.3)$$

$$D_e = \mu_e \cdot T_e \quad (2.4)$$

P elastik olmayan elektron-nötr çarpışmalar ve M büyümeye katkıda bulunan reaksiyon olmak üzere;

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_j \cdot k_j \cdot N_n \cdot n_e \quad (2.5)$$

$$R_e = \sum_{j=1}^M x_j \cdot a_j \cdot N_n \cdot |\Gamma_e| \quad (2.6)$$

$$R_\epsilon = \sum_{j=1}^p x_j \cdot k_j \cdot N_n \cdot n_e \cdot \Delta \epsilon_j \quad (2.7)$$

$$k_k = \gamma \cdot \int_0^\infty \epsilon \cdot G_k(\epsilon) \cdot d_\epsilon \cdot f(\epsilon) \quad (2.8)$$

$$\gamma = \sqrt{\frac{2 \cdot q}{m_e}} (C^{1/2} / \text{kg}^{1/2}) \quad (2.9)$$

$$R_\varepsilon = \sum_{j=1}^p x_j \cdot a_j \cdot N_n \cdot |\Gamma_e| \cdot \Delta \varepsilon_j \quad (2.10)$$

Elektron olmayan türler için her birinin kütle fraksiyon denklemi;

$$p \cdot \frac{\partial}{\partial t} (w_k) + p \cdot (u \cdot \nabla) \cdot w_k = \nabla j_k + R_k \quad (2.11)$$

Elektrostatik alan denklemi

$$-\nabla \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \nabla V = p \quad (2.12)$$

$$p = q \cdot (\sum_{k=1}^N x_k \cdot n_k - n_e) \quad (2.13)$$

Plazma boundary (sınır) denklemleri

Katottan çıkan elektronlar RF deşarjlarının aksine, deşarji sürdürme mekanizması olarak ikincil emisyonudur. Katot yüzeyine bir iyon çarptığında belirtilen olasılıklarla katot yüzeyinden bir elektron yayılır. Bu elektronlar daha sonra katoda yakın güçlü elektrik alanı başlatmak için yeterli enerji elde ettiklerinde iyonlaşma yaparlar. Duvar ve ikincil emisyon etkileri nedeniyle kazanılmış elektronlar, birkaç ortalama serbest yol içinde rastgele hareket nedeniyle duvarda kaybolur.

Yüzey reaksiyonları

Çizelge 2.1. Yüzey reaksiyon formülleri

Reaksiyon sayısı	Formül
1	Ars => Ar
2	Ar+ => Ar

2.1.3. Mesh (örgü) bölümü

Tasarımı yapılacak sistemimizin tamamının yüksek kaliteli olacak şekilde mesh yapısı düzenlenmiştir. Analiz öncesi sonlu eleman analizi (gaz deşarj sırasında arka planında meydana gelen elektron yoğunluk ve plazma fiziği parametrelerinin oluşum safhaları, denklemleri, yöntemleri ve farklı değişen dinamik verileri) [58] olarak tanımlanan mesh yapısının teorik hesaplamaların deneysel verilere daha yakın sonuçlar vermesi açısından yapıldığı bölümdür. Mesh türlerine göre analiz verileri daha doğru bir yaklaşım olduğu için yaklaşık 42 500 elemanlı mesh yapısı çözüm için uygulanmıştır.

2.1.4. Çözümleme-zaman bölümü

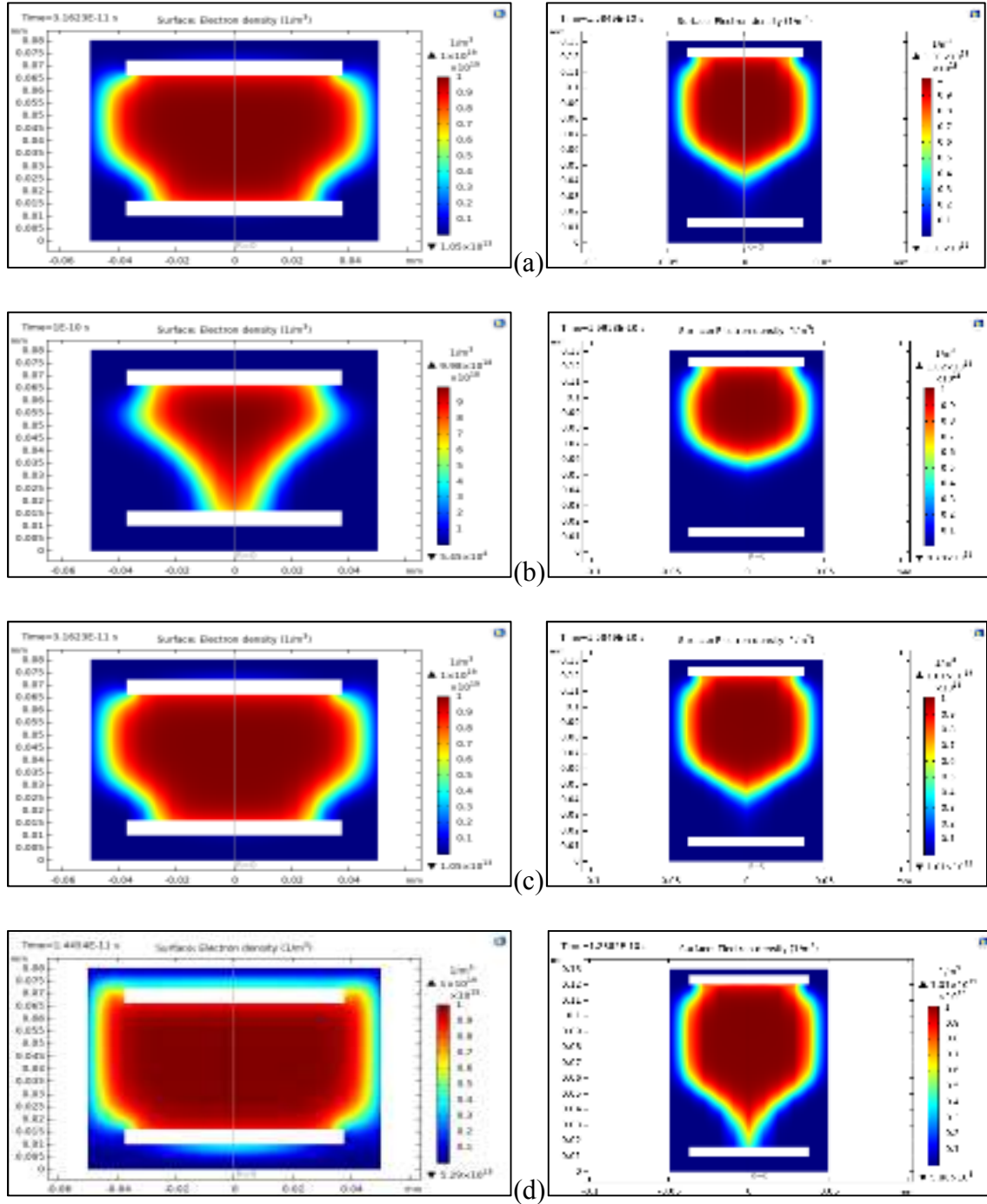
Bu kısımda Dc boşalma bölge aralıklarının oluşması için zamana bağlı değerler girilmiştir. Plazma oluşumunu daha rahat görebilmek ve girdiğimiz verilerin doğruluğunu ispatlayarak tam Glow Dc boşalma oluşumu için geçerli ve gereken zaman değer aralıkları burada girilmiştir. Ayrıca hangi çözüm yönteminin kullanılacağı ikincil emisyon değer aralıkları, başlangıç değerleri, sınır koşulları ve iyileştirmelerin yapıldığı kısımdır. Doğru değerlerin girilmesi halinde plazma için oluşacak elektron yoğunluğu, uzaysal yük yoğunluğu, elektron sıcaklığı, ortalama elektron enerjisi, göç eden elektron yoğunluğu gibi görsel sonuçların alındığı ve bu görsellere bağlı grafiklerin oluştuğu kısımdır. İstenilen istatistiksel sonuçlar bu bölümde ara yüz sayesinde girilerek elde edilmektedir.

2.1.5. Sonuçlar

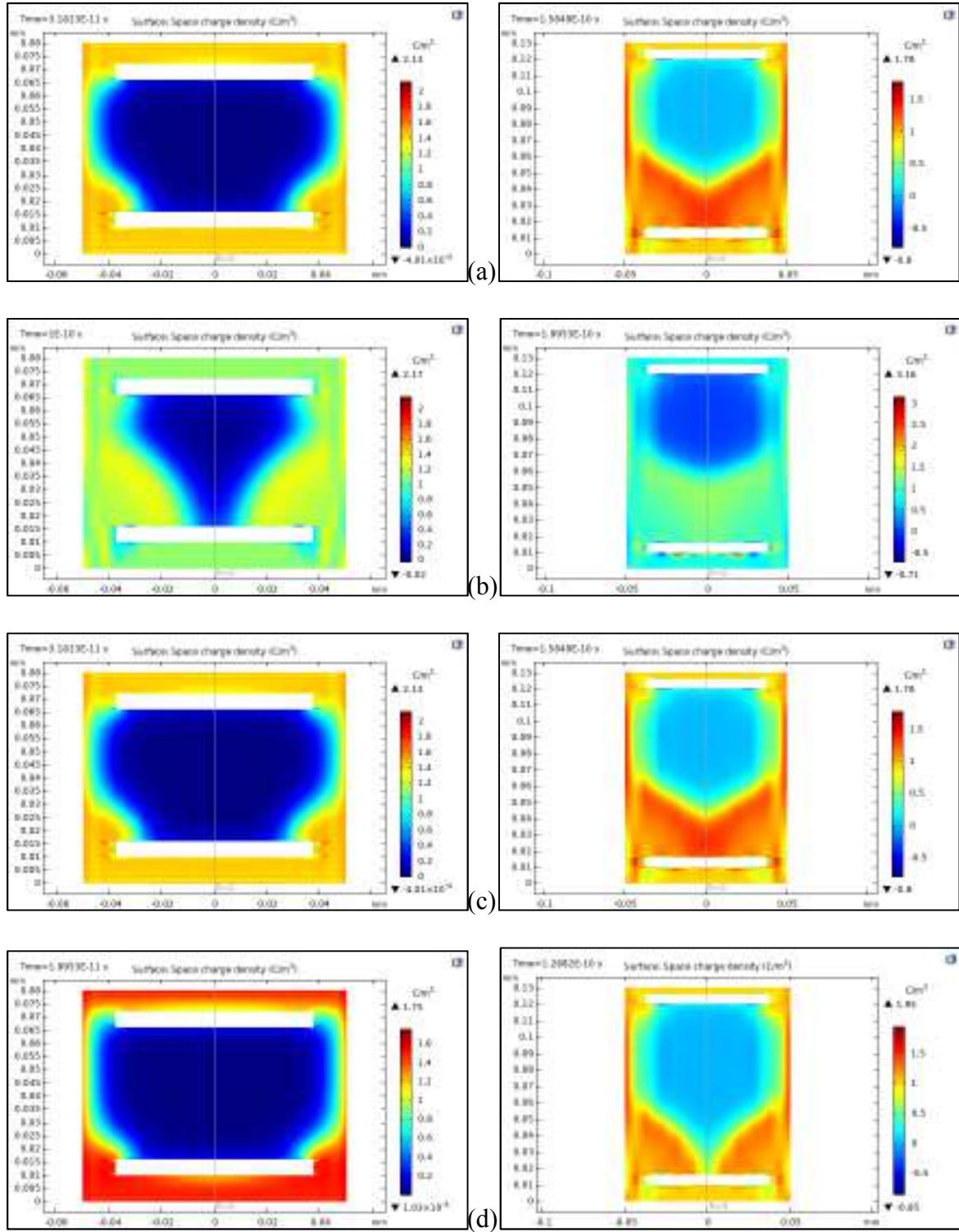
Analizin doğru yapıldığının sonucu olan bu bölümde yukarıda bahsedilen sıcaklık, yoğunluk, kararlılık durumlarının görsel ve grafiksel olarak gösterildiği kısımdır. Burada bir (1D), iki (2D), veya üç boyutlu (3D) veya asimetrik olarak verilerin doğruluğu ispatlanmaktadır. Grafiklerde elektron yoğunluğu, elektron akım yoğunluğu, uzay yük yoğunluğu, ortalama elektron enerjisi, sürüklenme hızı, elektriksel potansiyel dağılımı, elektron sıcaklık dağılımı, gaz iyon sayısı yoğunluğu, uyarılmış gaz iyon sayısı yoğunluğu ve sayılan dağılımların grafiksel oluşumları hesaplanır. Çalışmamızda Comsol Multiphysics programı yardımıyla elektron yoğunluğu, uzay yük yoğunluğu, elektron akım yoğunluğu farklı basınç ve voltaj değerlerinde aşağıdaki şekilde verilmiştir.

3. COMSOL MULTIPHYSIC SİMÜLASYON SONUÇLARI

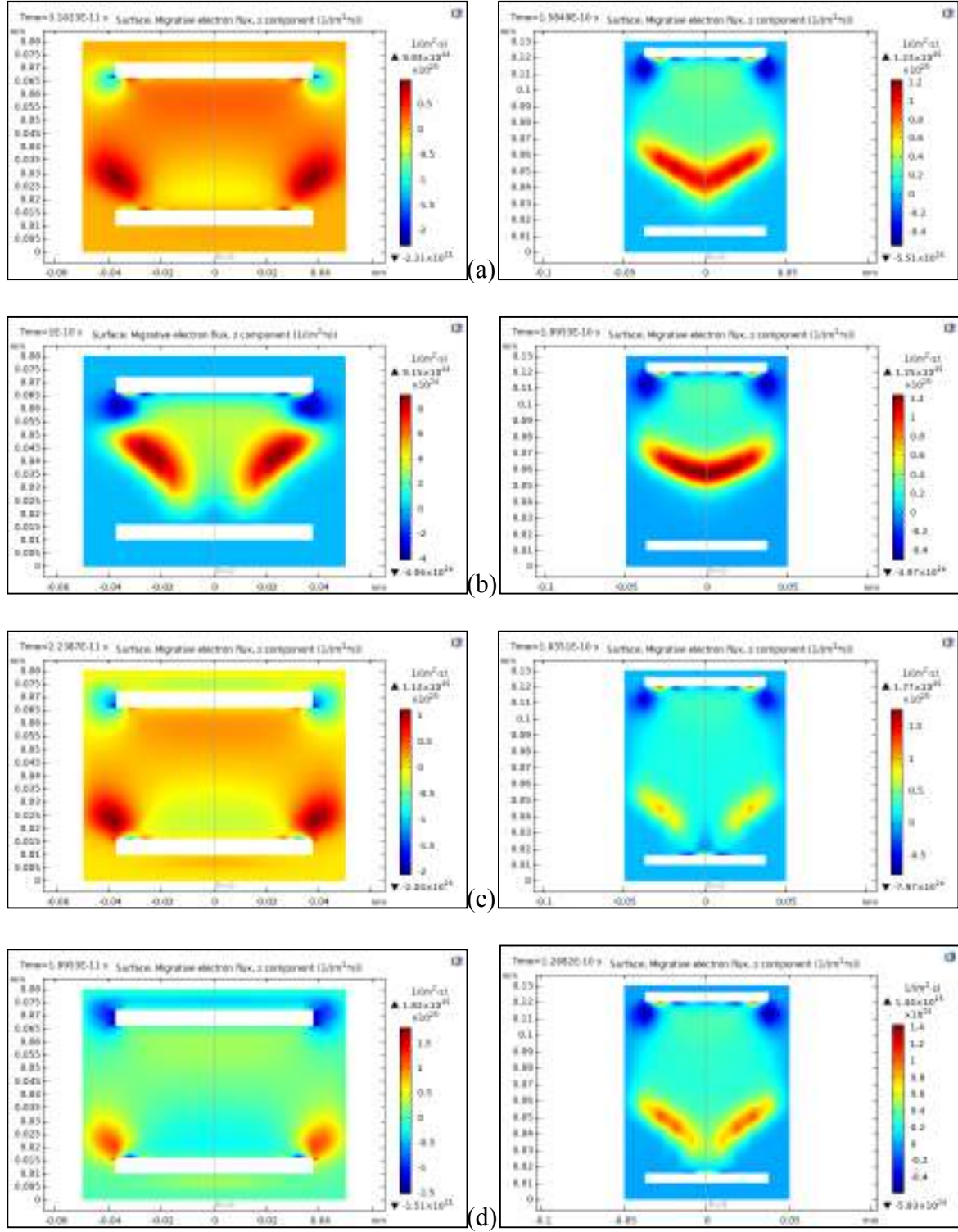
Bu kısımda Comsol Multiphysic programı ile yapılan simülasyonlarda farklı basınçlarda, farklı katot malzemelerinde ve elektrotlar arası mesafeler değiştirilerek plazma oluşum görüntüleri verilmiştir.



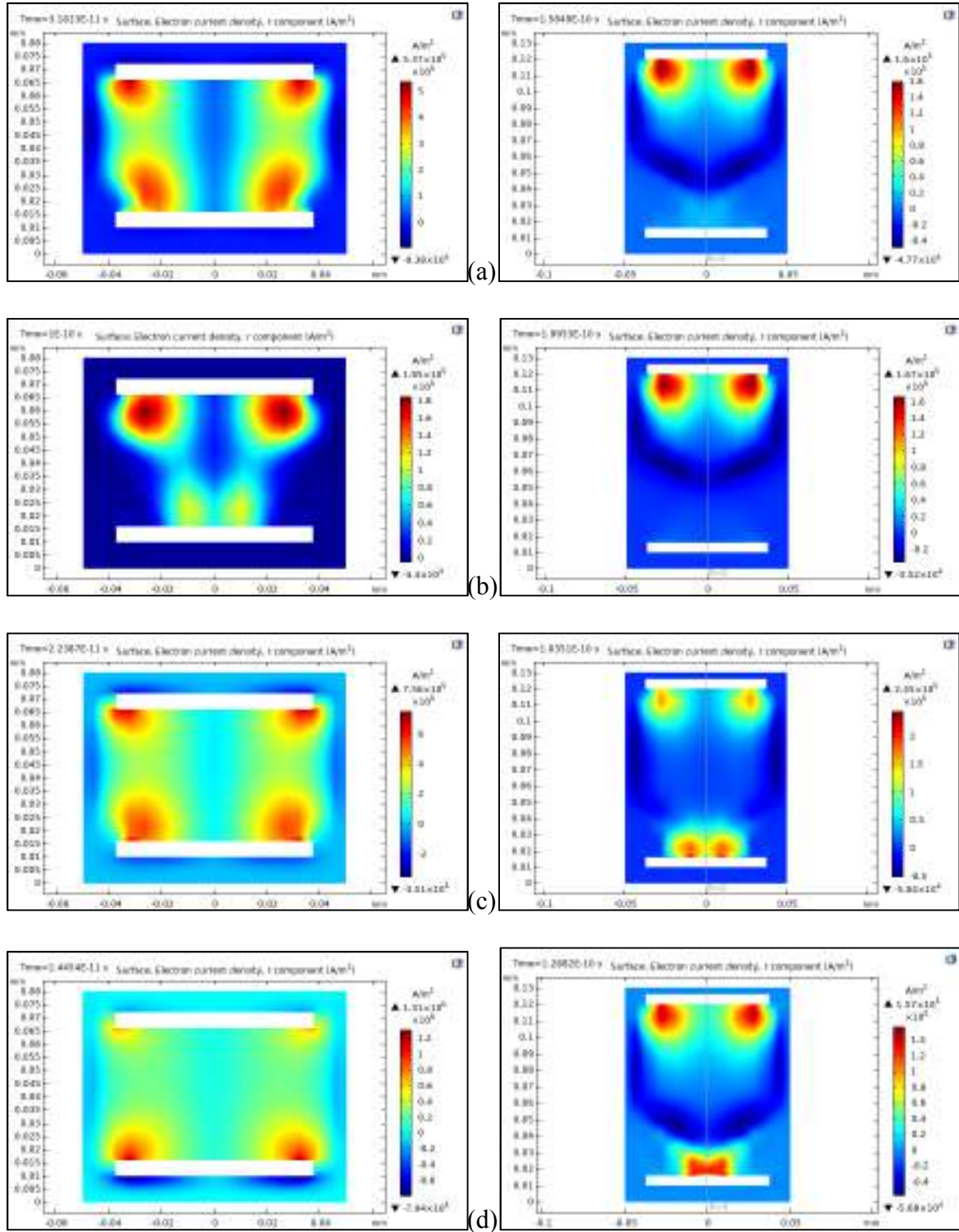
Şekil 3.1. p=22 torr basınç altında 50 μm ve 100 μm elektron yoğunluk oluşumları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



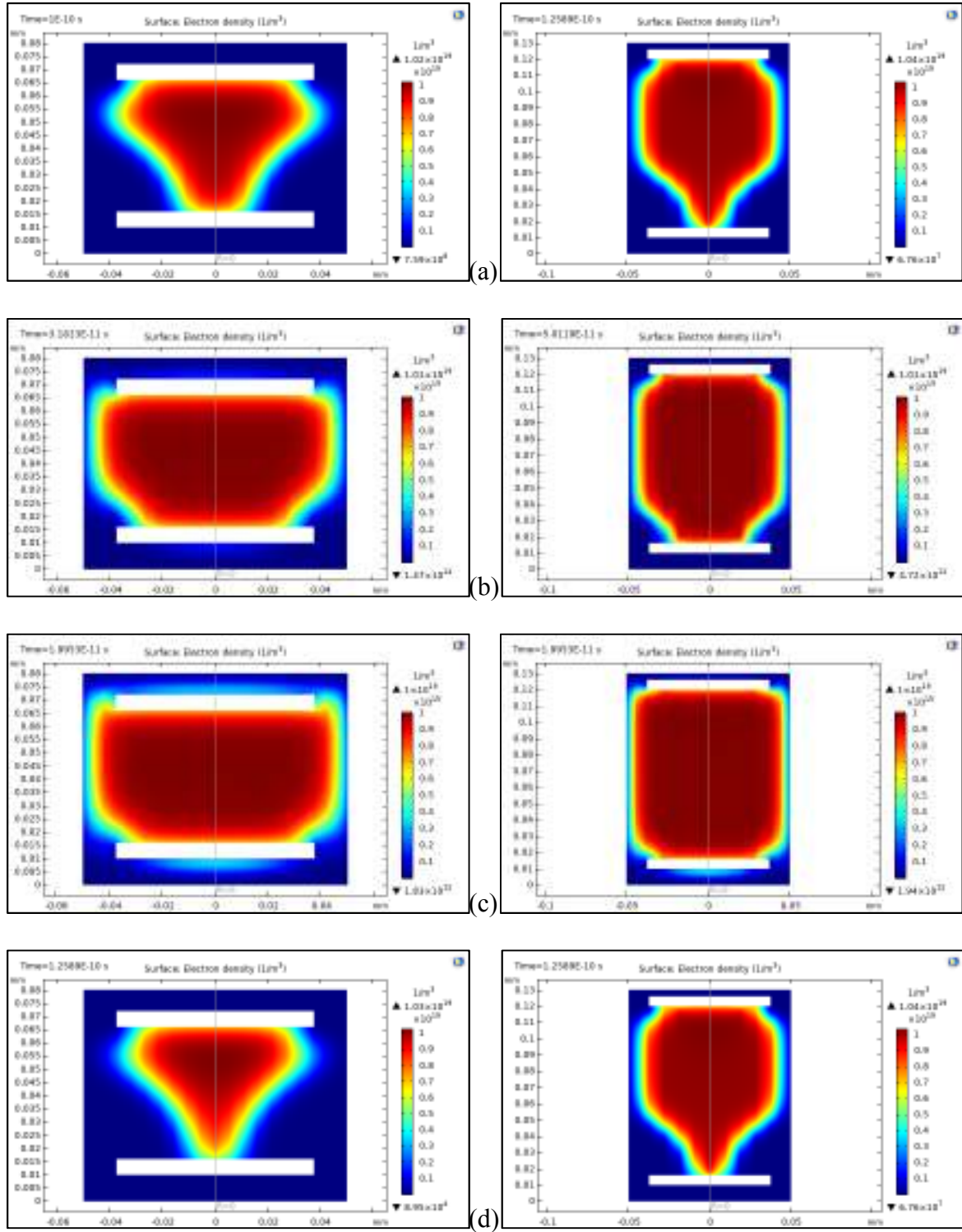
Şekil 3.2. $p=22$ torr basınç altında 50 μm ve 100 μm uzaysal yük yoğunlukları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



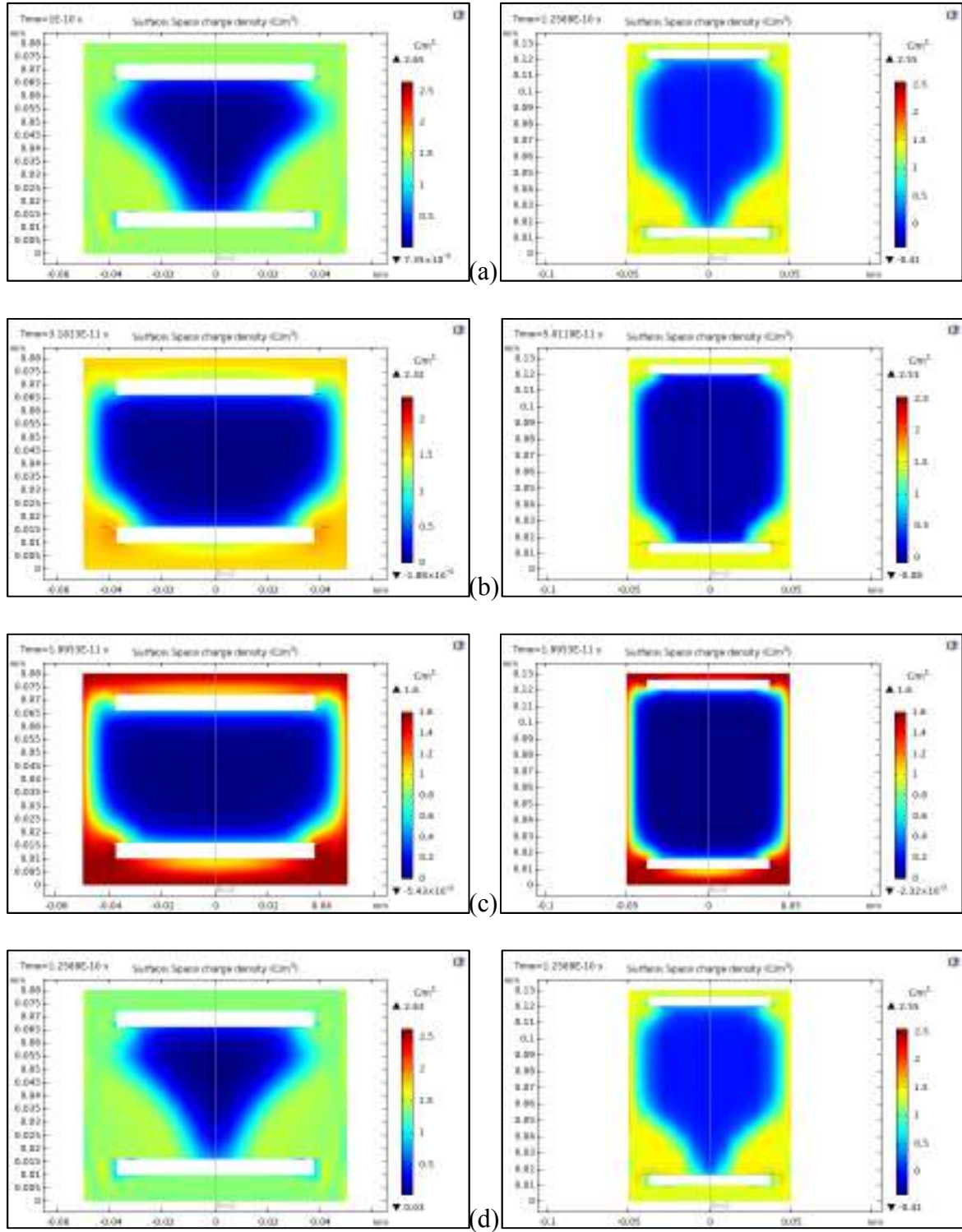
Şekil 3.3. $p=22$ torr basınç altında $50 \mu m$ ve $100 \mu m$ göç eden elektron dağılımları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



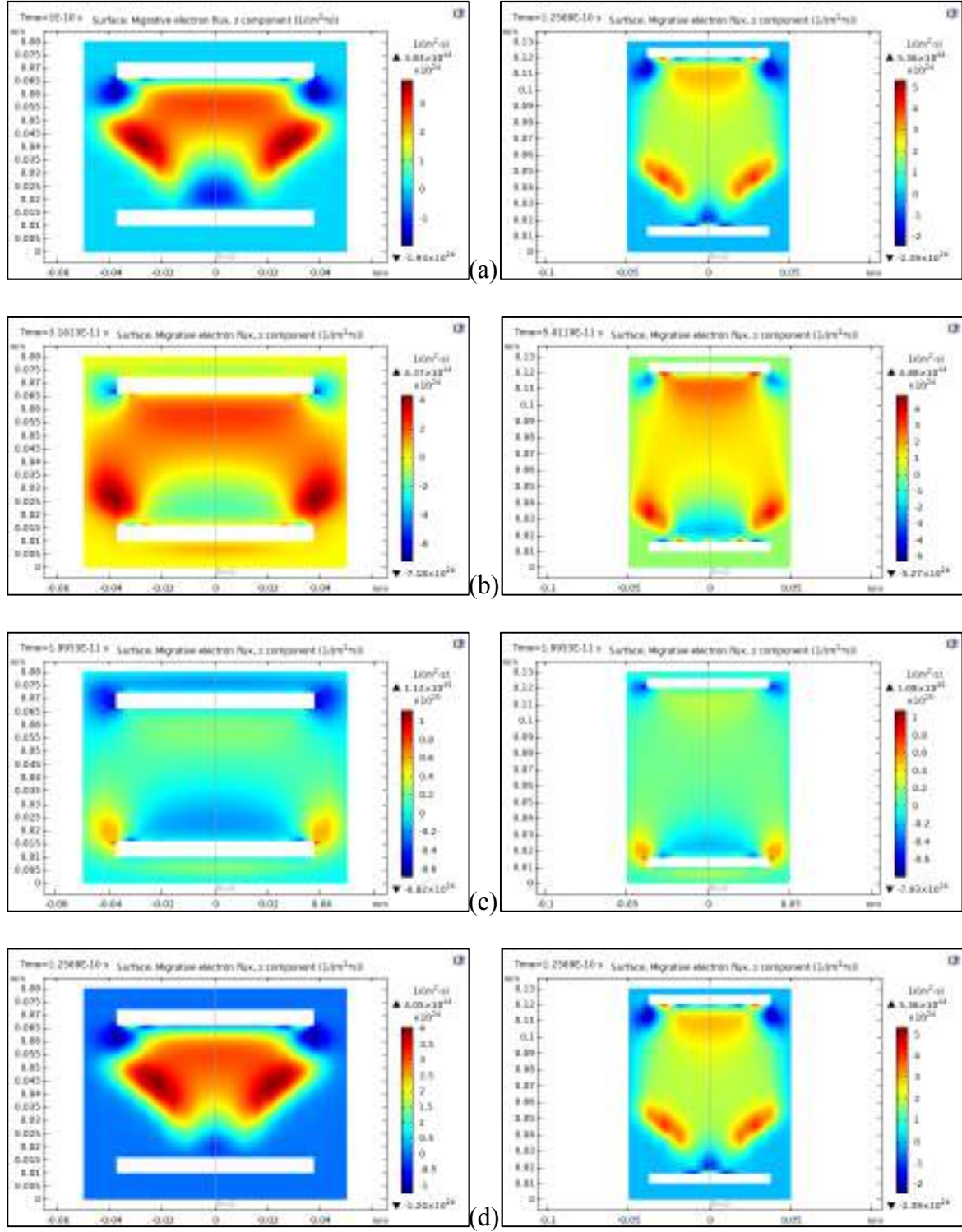
Şekil 3.4. $p=22$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ elektron akım yoğunlukları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



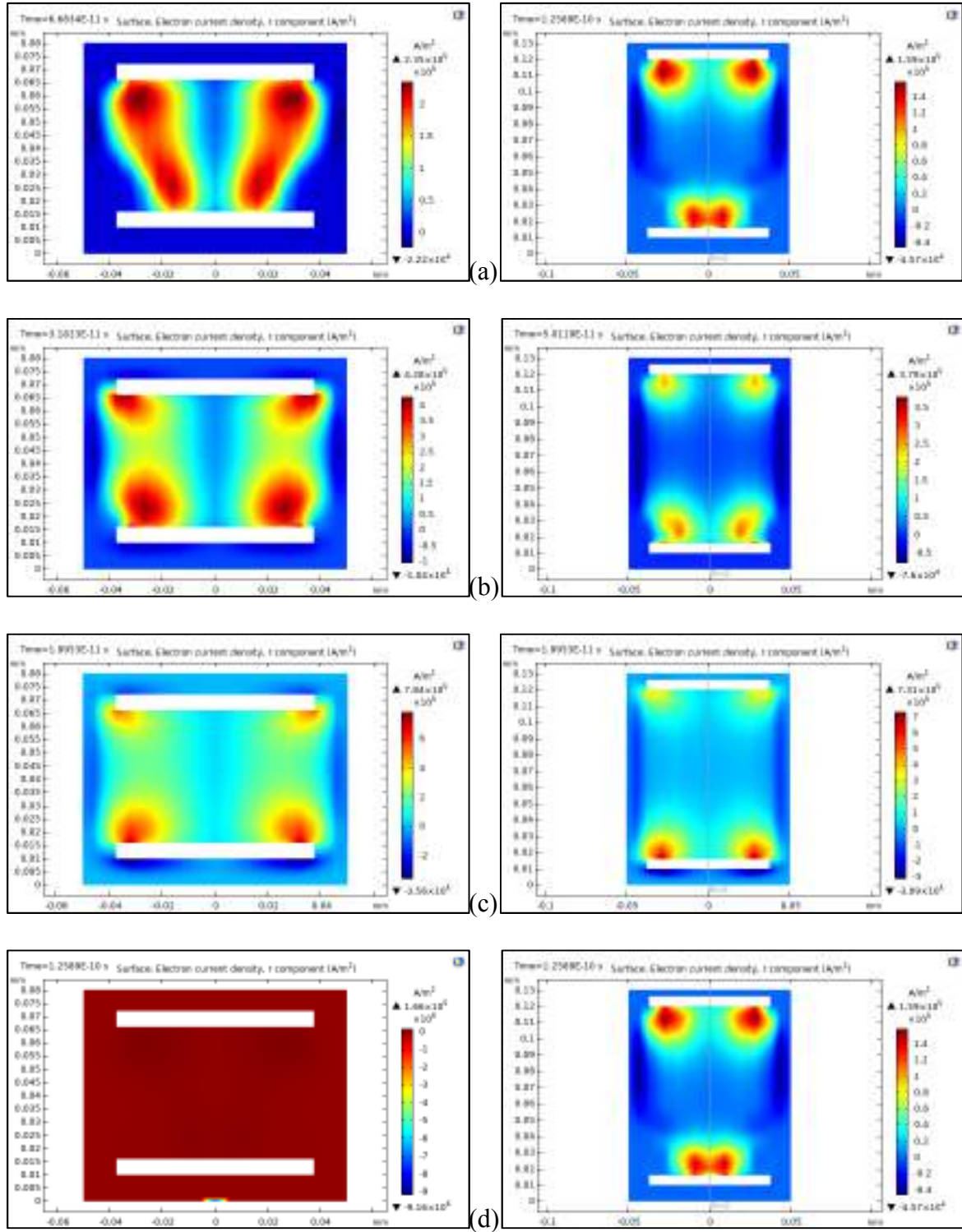
Şekil 3.5. $p=66$ torr basınç altında $50 \mu\text{m}$ ve $100 \mu\text{m}$ elektron yoğunluk oluşumları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



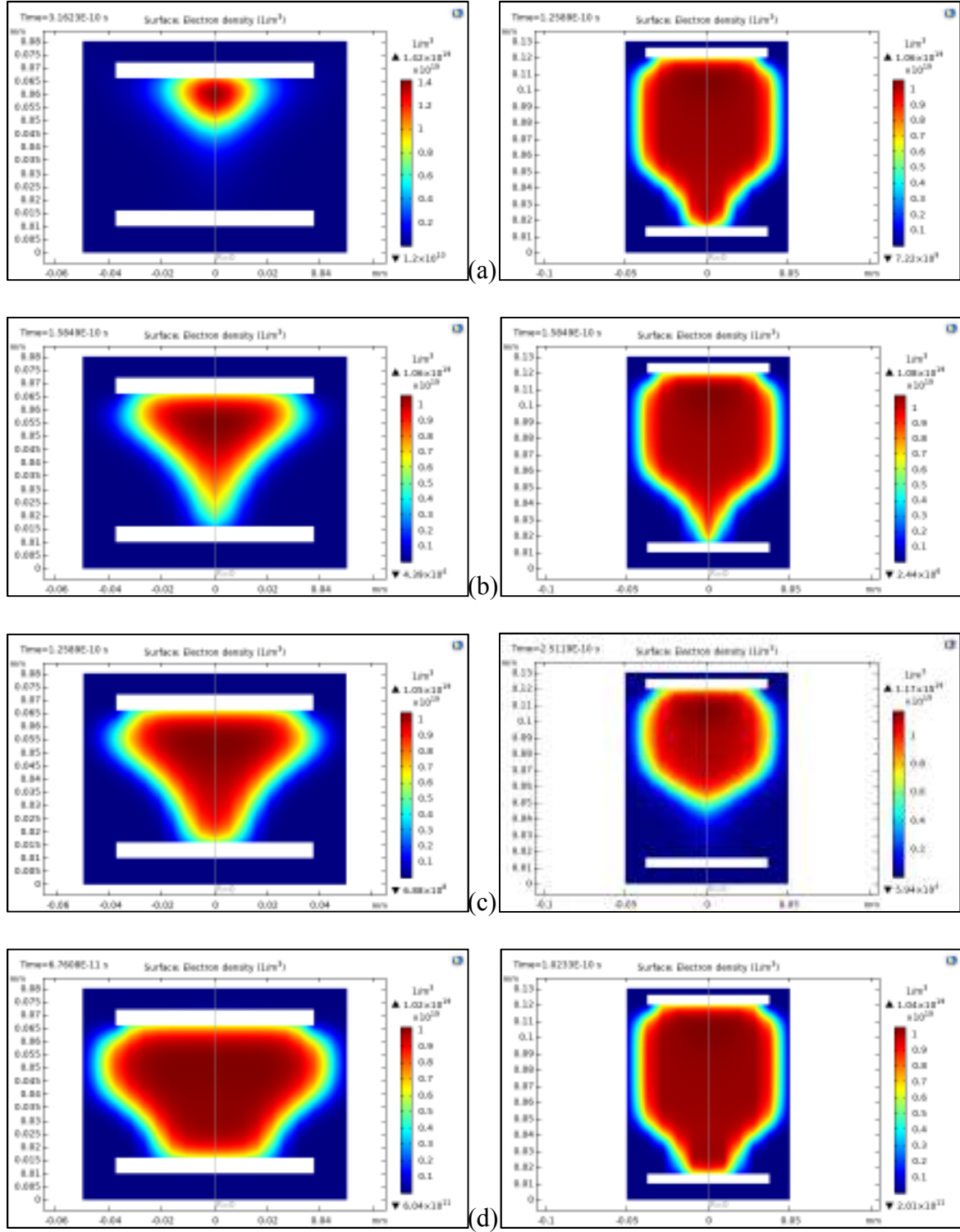
Şekil 3.6. p=66 torr basınç altında 50 μm ve 100 μm uzaysal yük yoğunlukları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



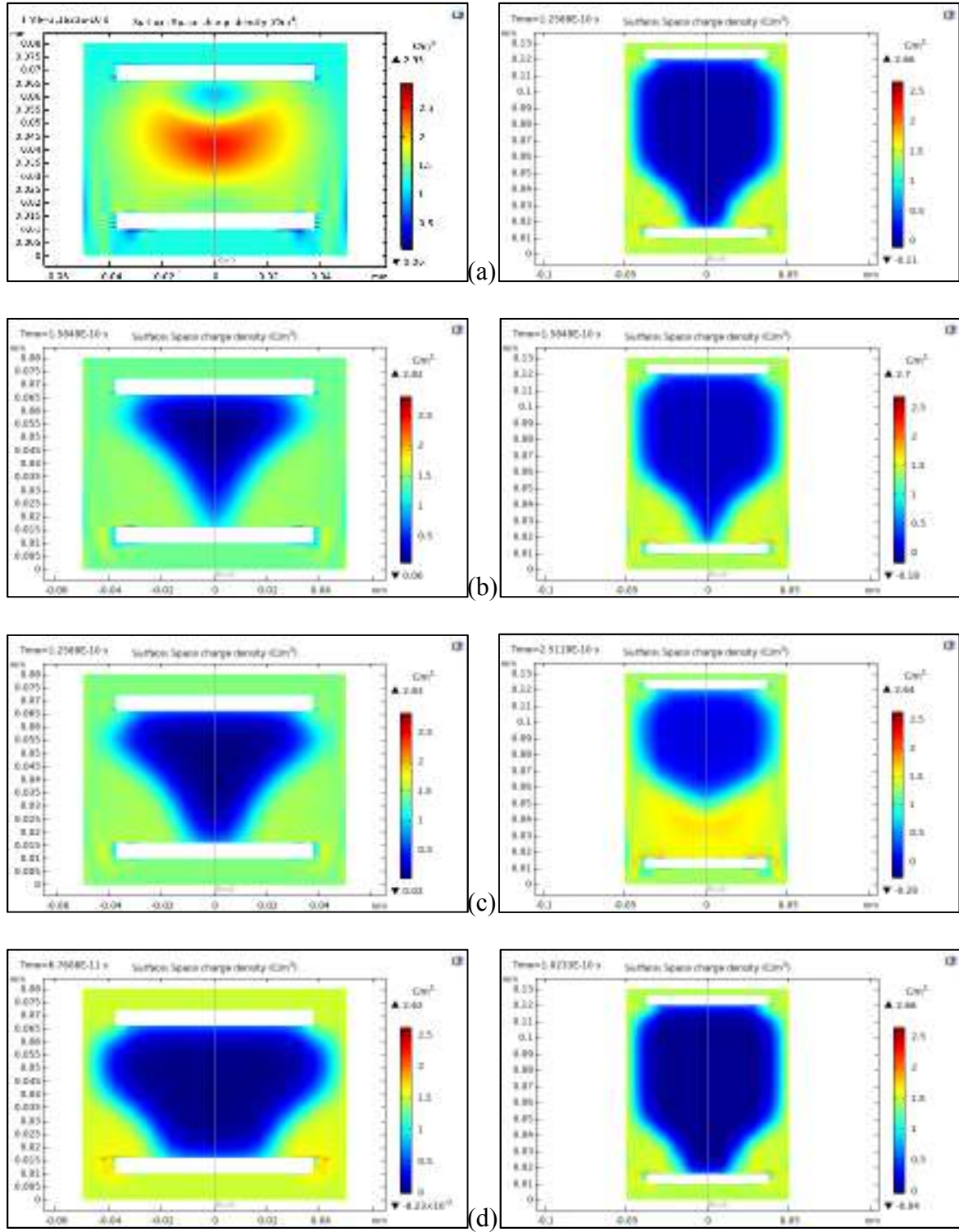
Şekil 3.7. $p=66$ torr basınç altında $50 \mu\text{m}$ ve $100 \mu\text{m}$ göç eden elektron dağılımları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



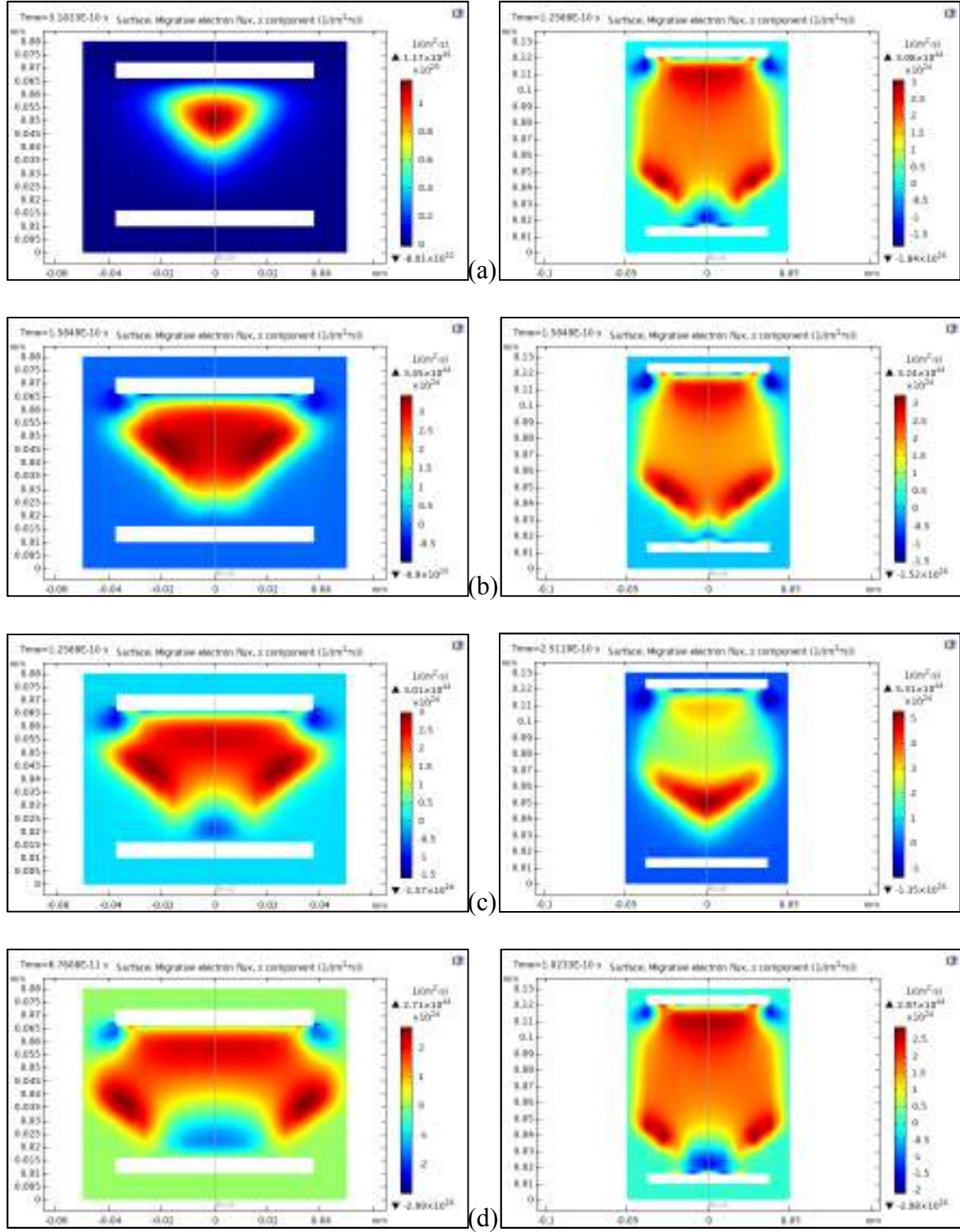
Şekil 3.8. $p=66$ torr basınç altında $50\ \mu m$ ve $100\ \mu m$ elektron akım yoğunlukları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



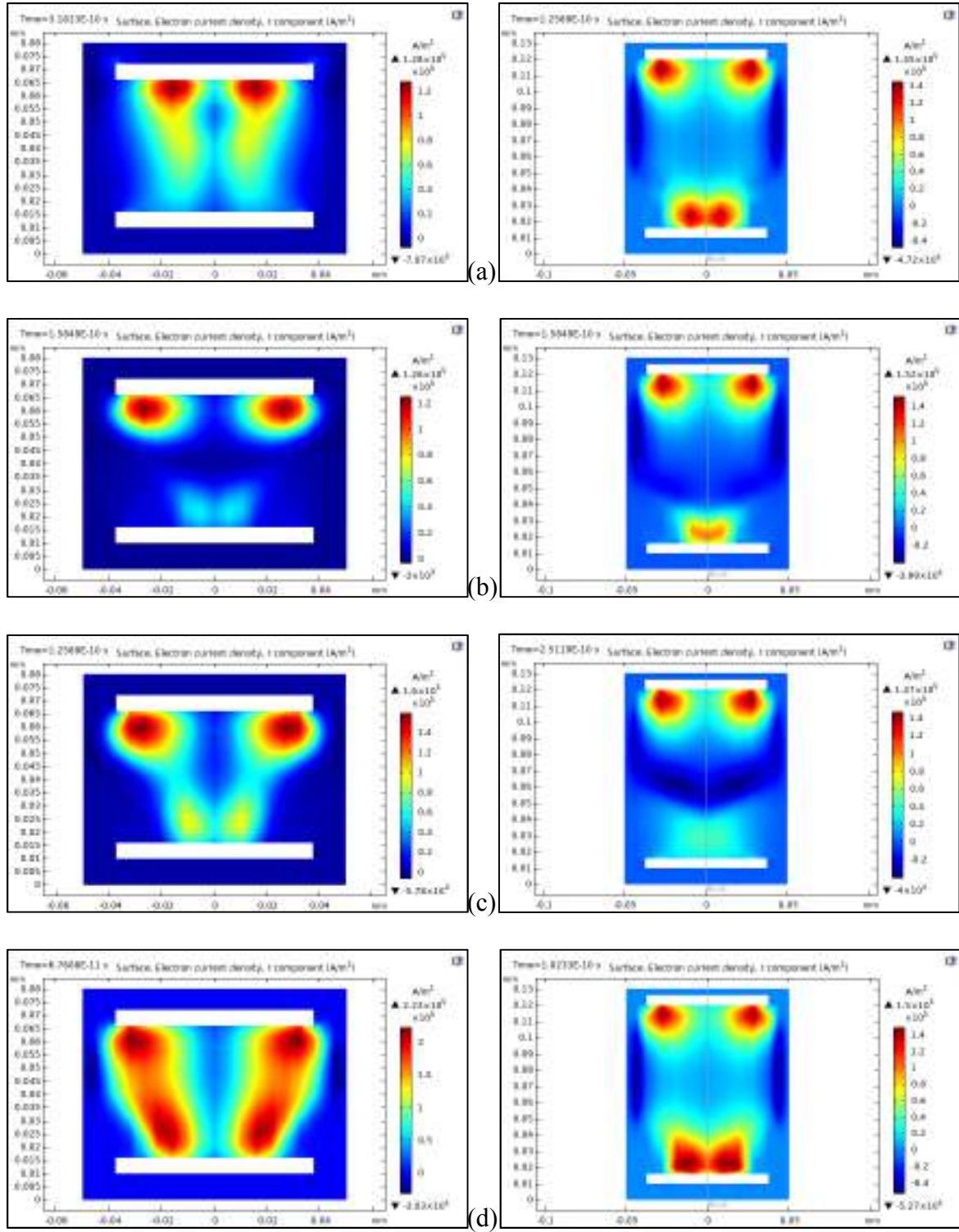
Şekil 3.9. $p=100$ torr basınç altında $50 \mu\text{m}$ ve $100 \mu\text{m}$ elektron yoğunluk oluşumları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



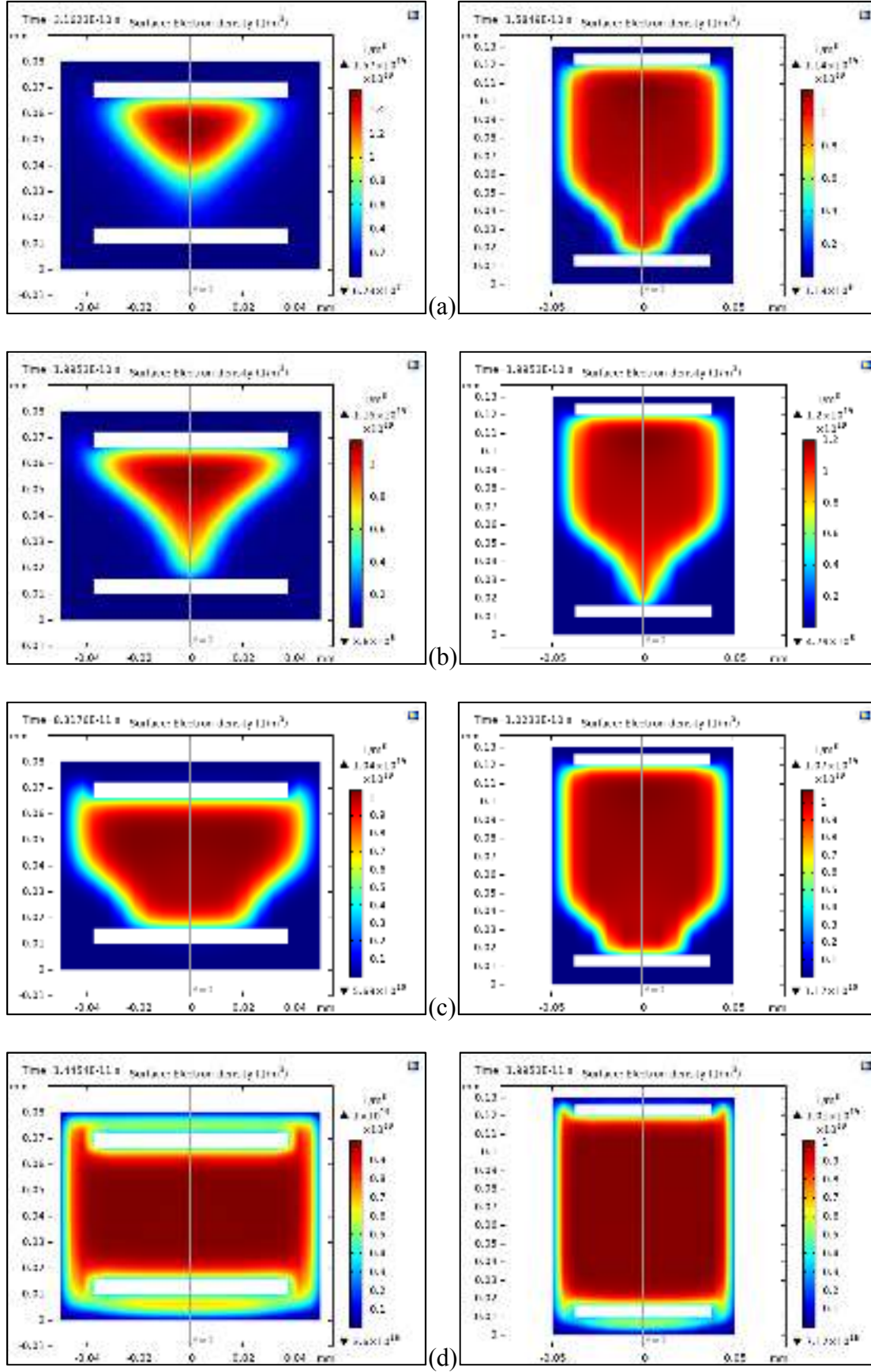
Şekil 3.10. $p=100$ torr basınç altında $50\ \mu\text{m}$ ve $100\ \mu\text{m}$ uzaysal yük yoğunlukları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



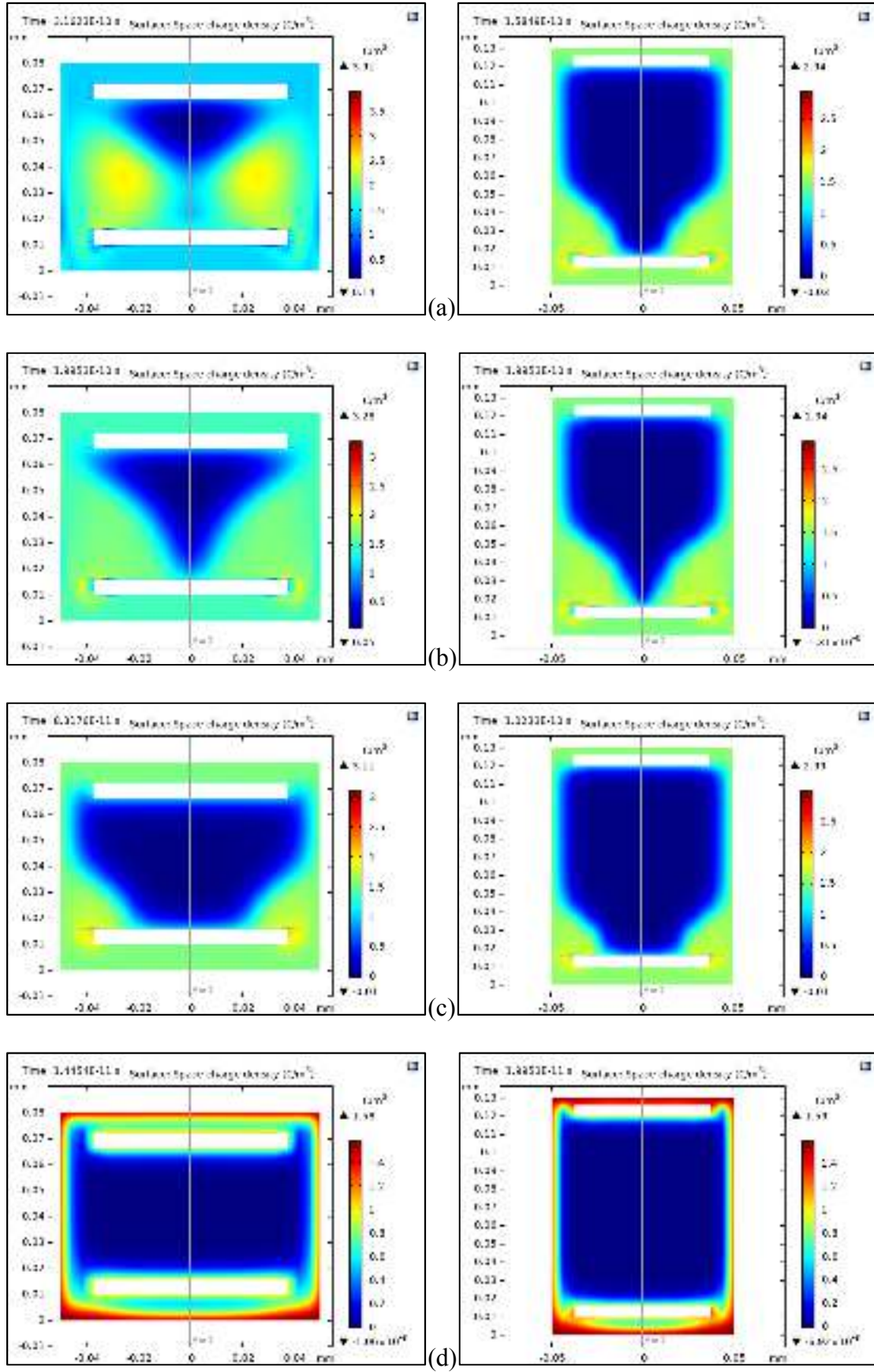
Şekil 3.11. $p=100$ torr basınç altında $50 \mu m$ ve $100 \mu m$ göç eden elektron dağılımları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



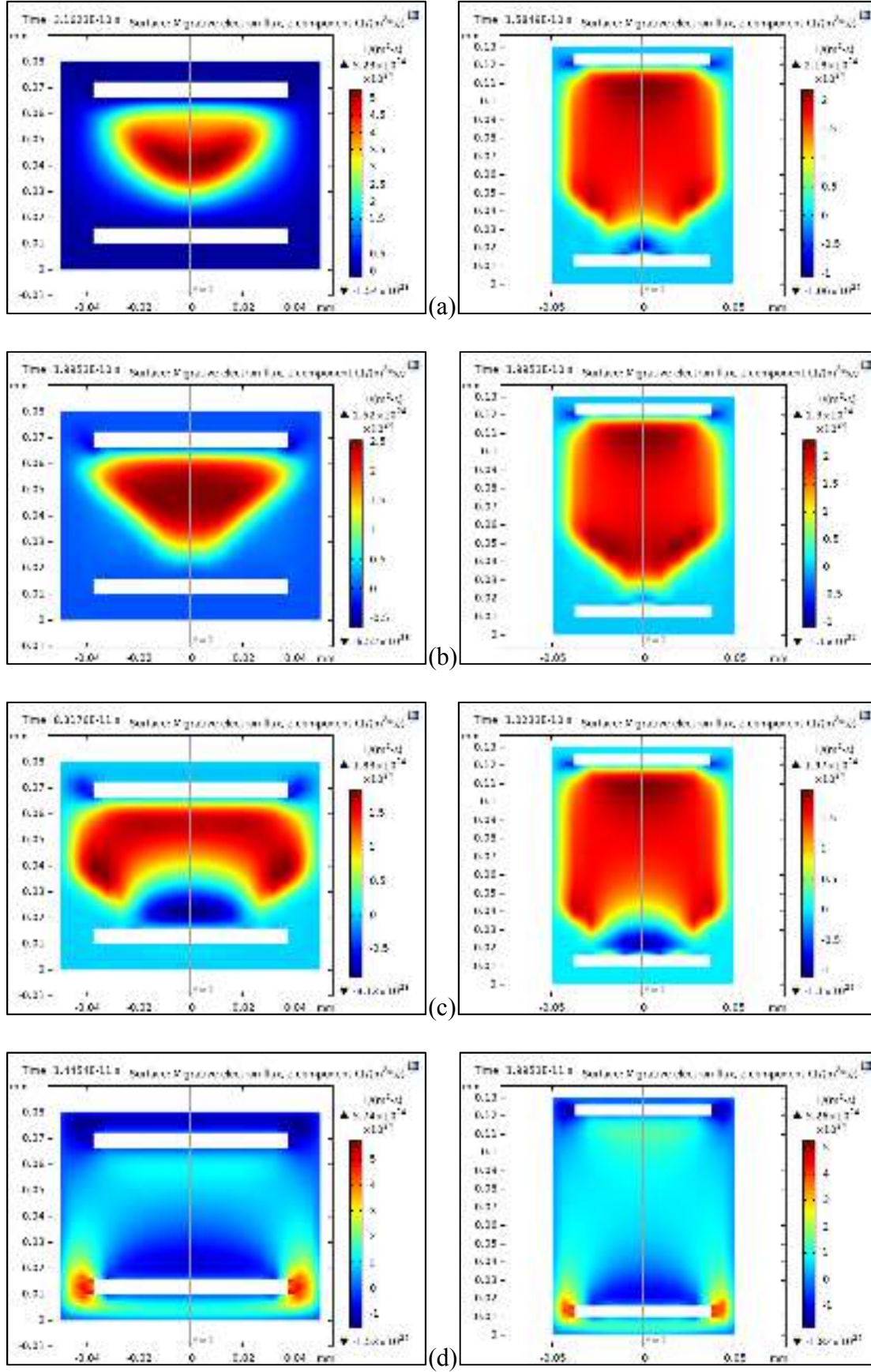
Şekil 3.12. $p=100$ torr basınç altında 50 μm ve 100 μm elektron akım yoğunlukları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



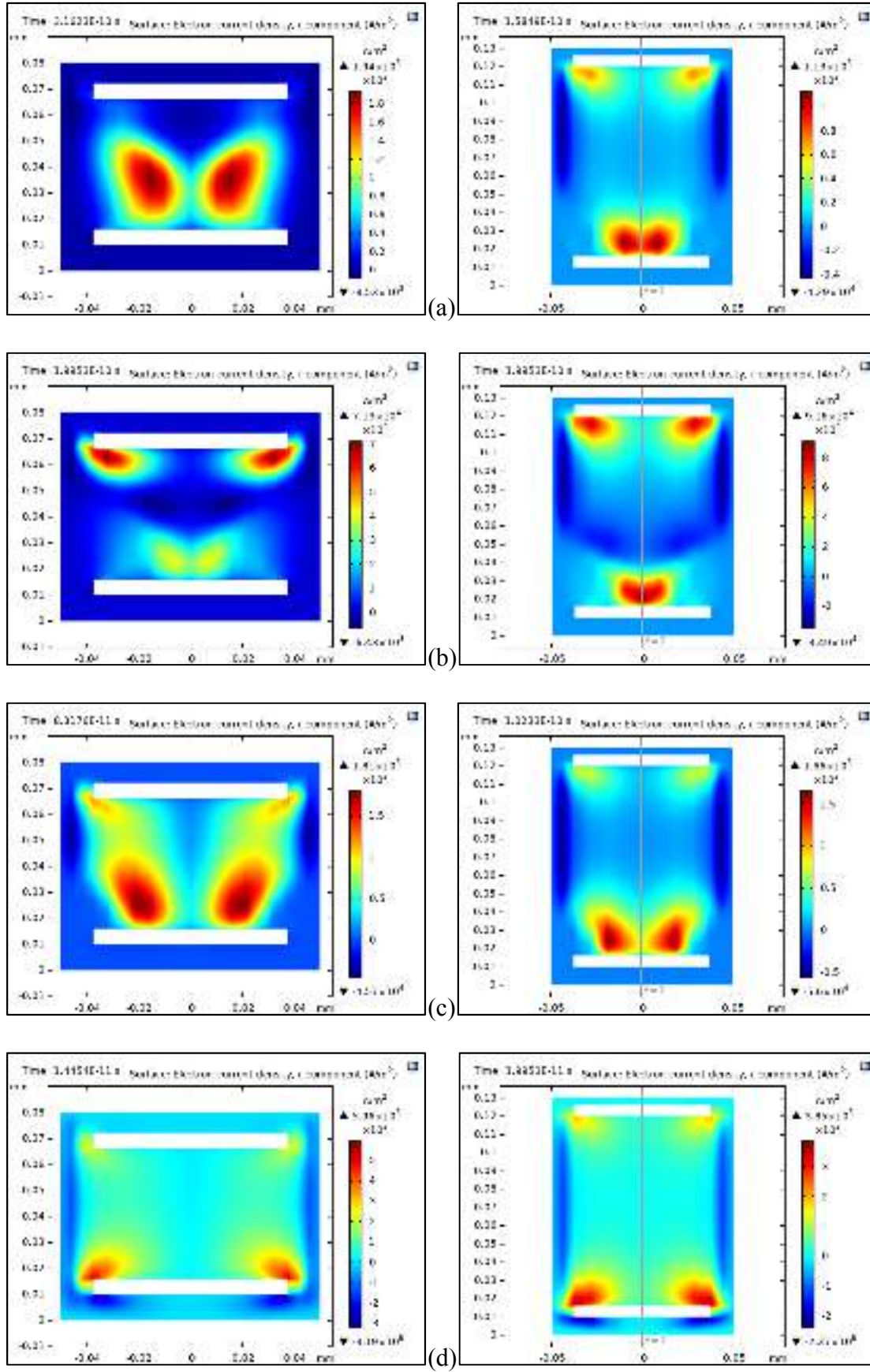
Şekil 3.13. $p=220$ torr basınç altında $50 \mu\text{m}$ ve $100 \mu\text{m}$ elektron yoğunluk oluşumları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



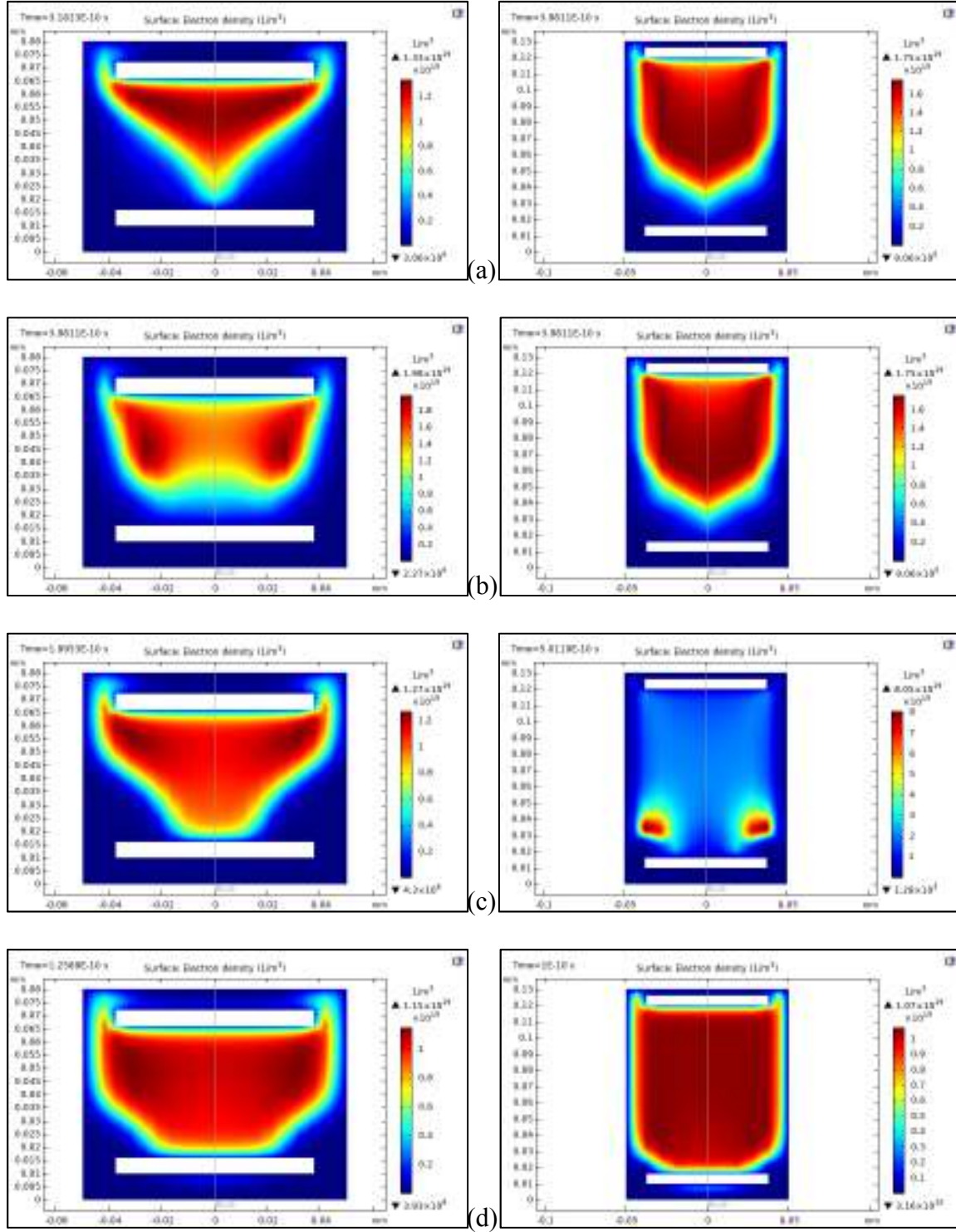
Şekil 3.14. p=220 torr basınç altında 50 μm ve 100 μm uzaysal yük yoğunlukları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



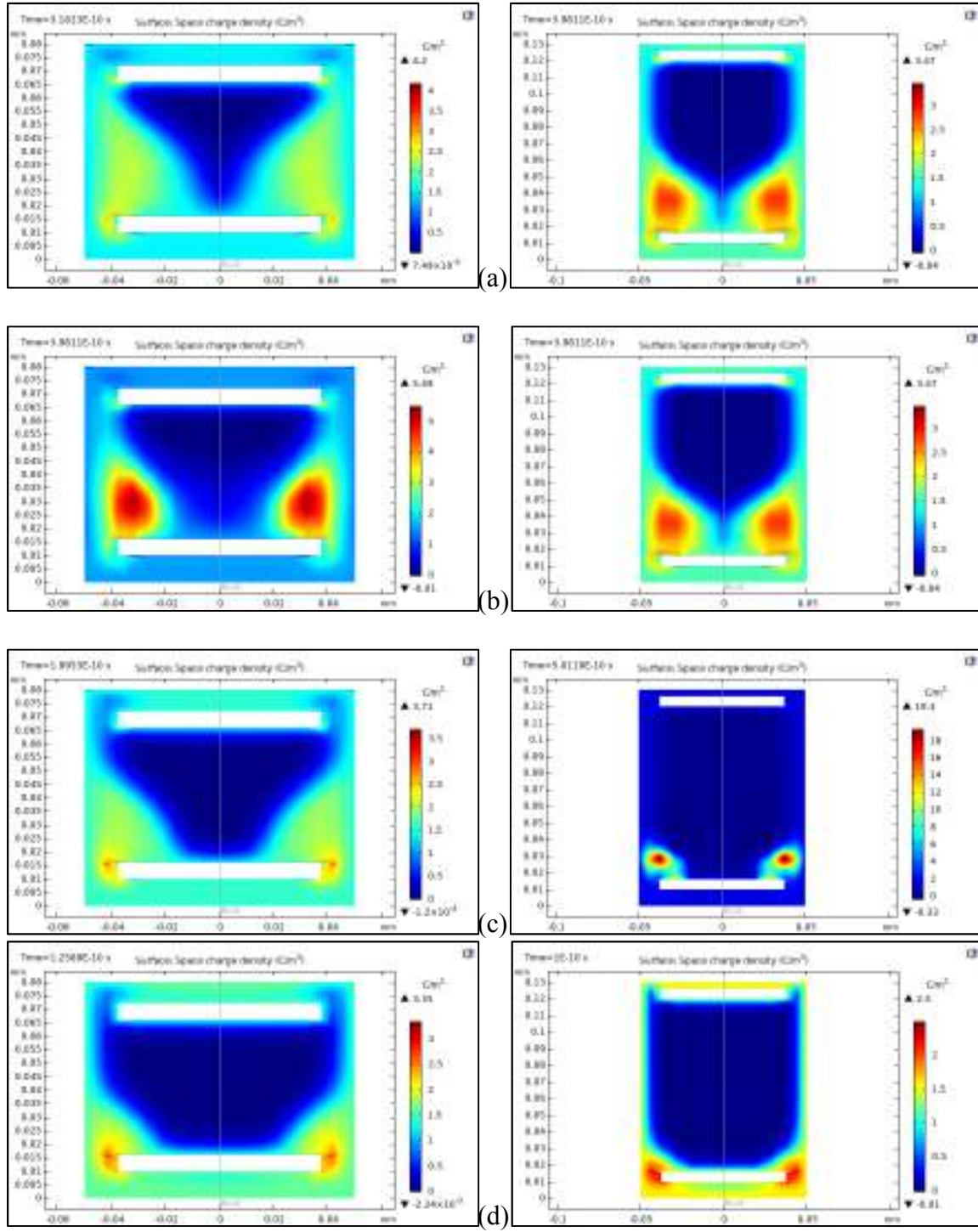
Şekil 3.15. $p=220$ torr basınç altında $50 \mu\text{m}$ ve $100 \mu\text{m}$ göç eden elektron dağılımları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



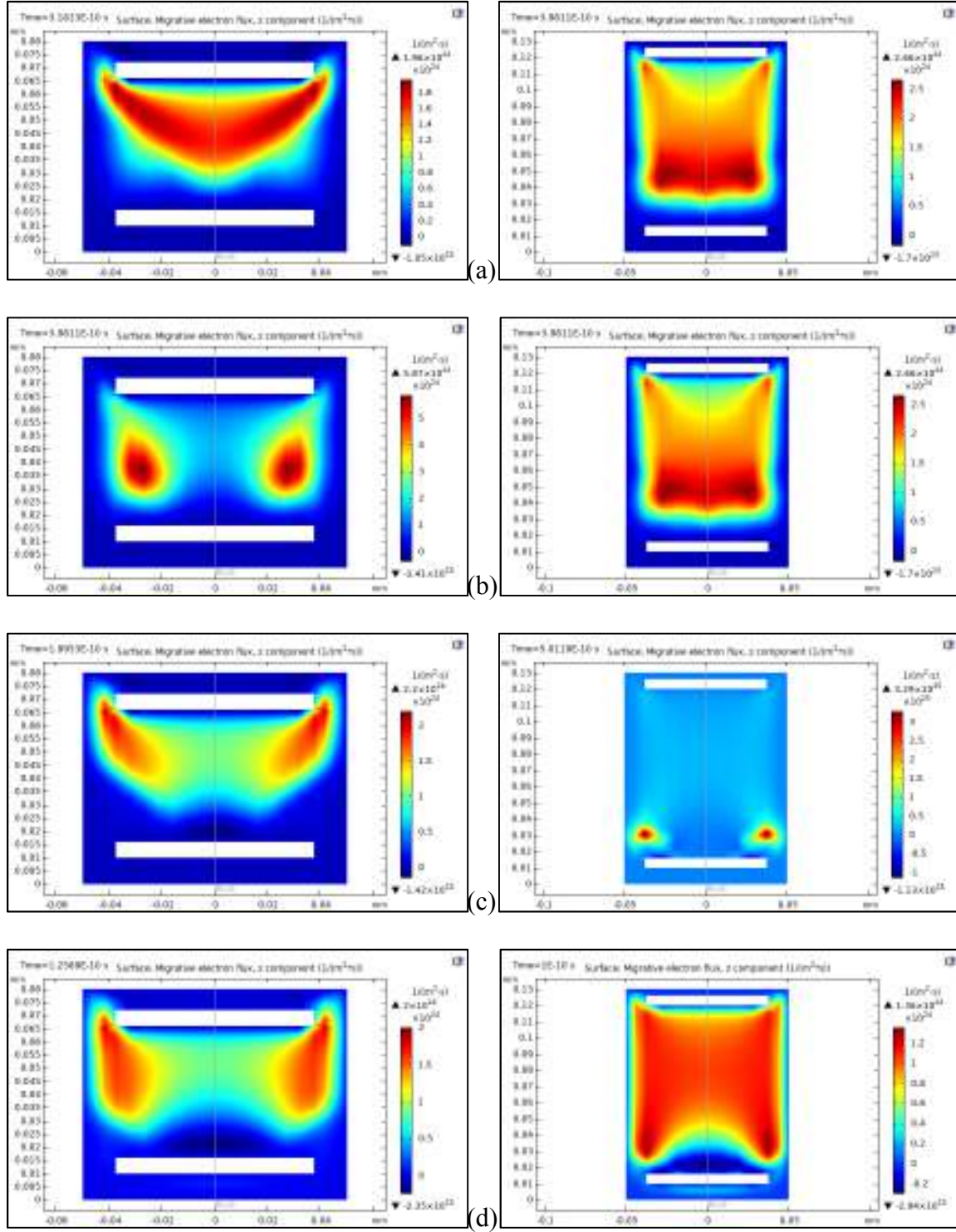
Şekil 3.16. $p=220$ torr basınç altında 50 μm ve 100 μm elektron akım yoğunlukları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



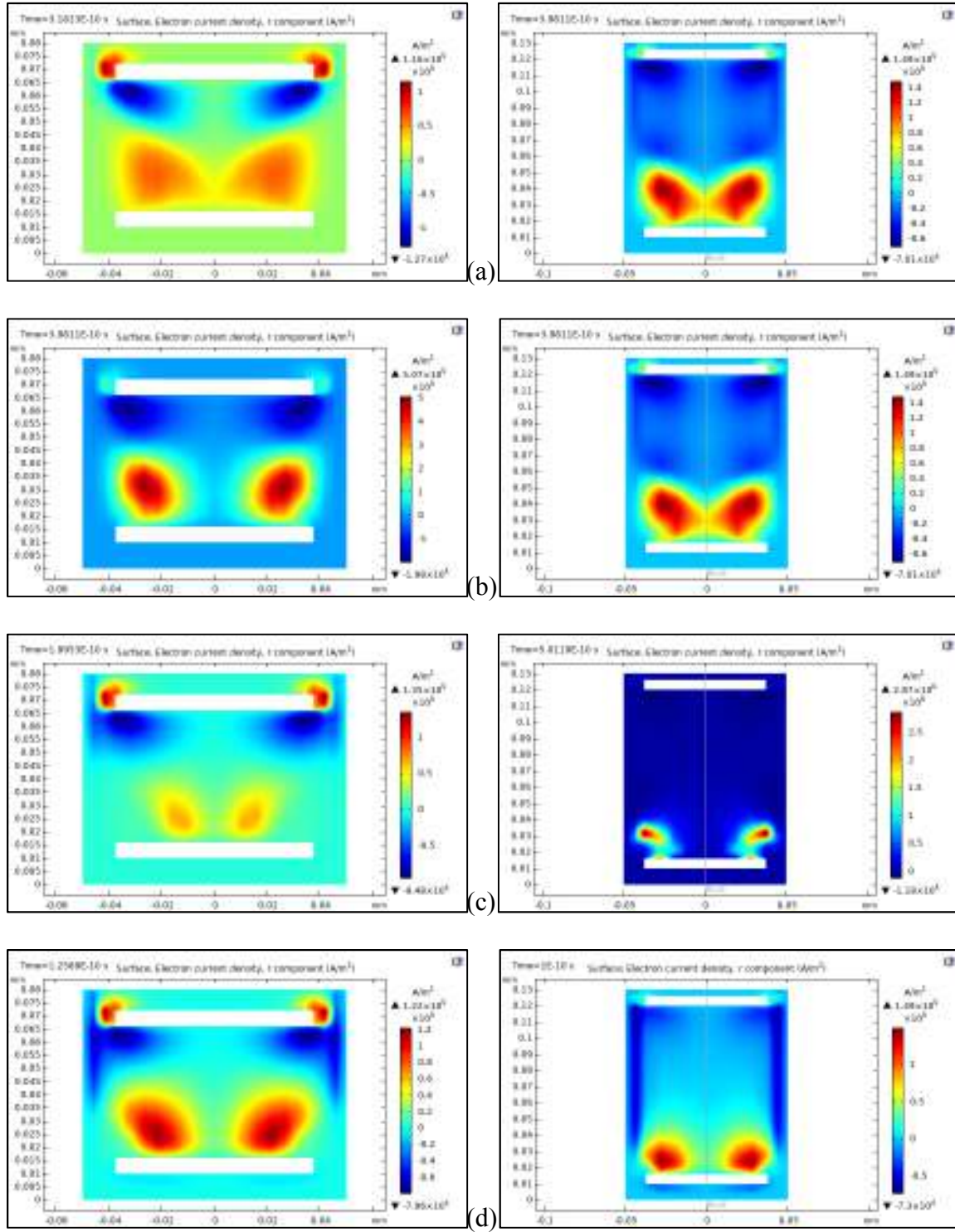
Şekil 3.17. $p=760$ torr basınç altında $50 \mu\text{m}$ ve $100 \mu\text{m}$ elektron yoğunluk oluşumları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



Şekil 3.18. $p=760$ torr basınç altında $50 \text{ } \mu\text{m}$ ve $100 \text{ } \mu\text{m}$ uzaysal yük yoğunlukları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



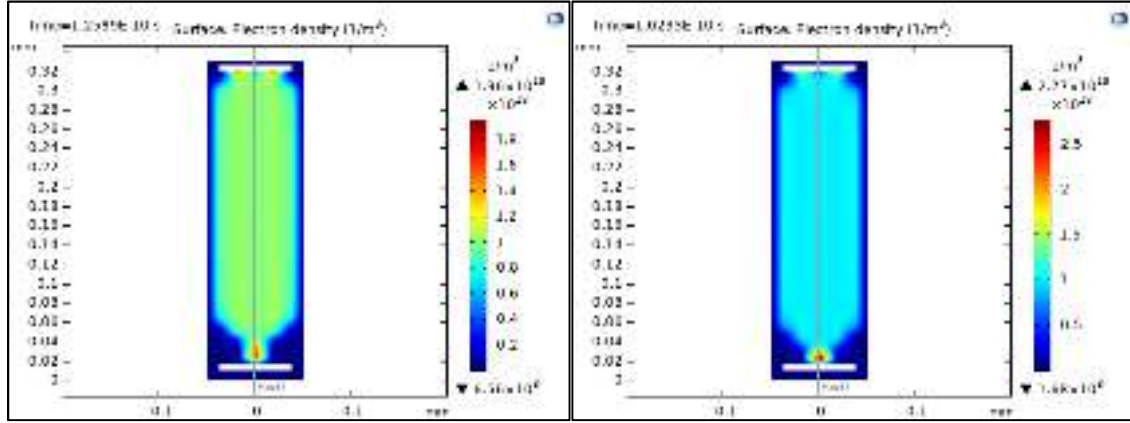
Şekil 3.19. $p=760$ torr basınç altında $50 \mu m$ ve $100 \mu m$ göç eden elektron dağılımları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC



Şekil 3.20. p=760 torr basınç altında 50 μm ve 100 μm elektron akım yoğunlukları a)GaAs b)HgCdTe c)Grafen d)SiC

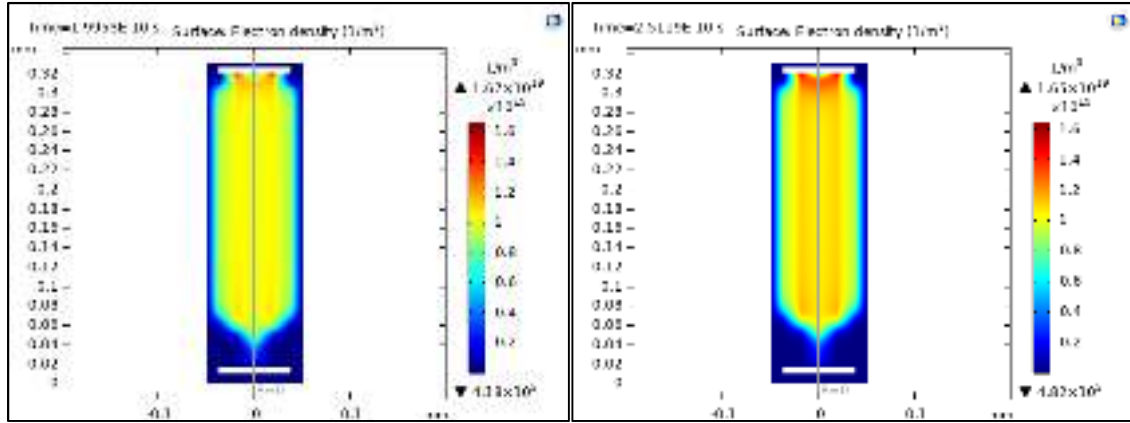
a)22 torr

b)44 torr



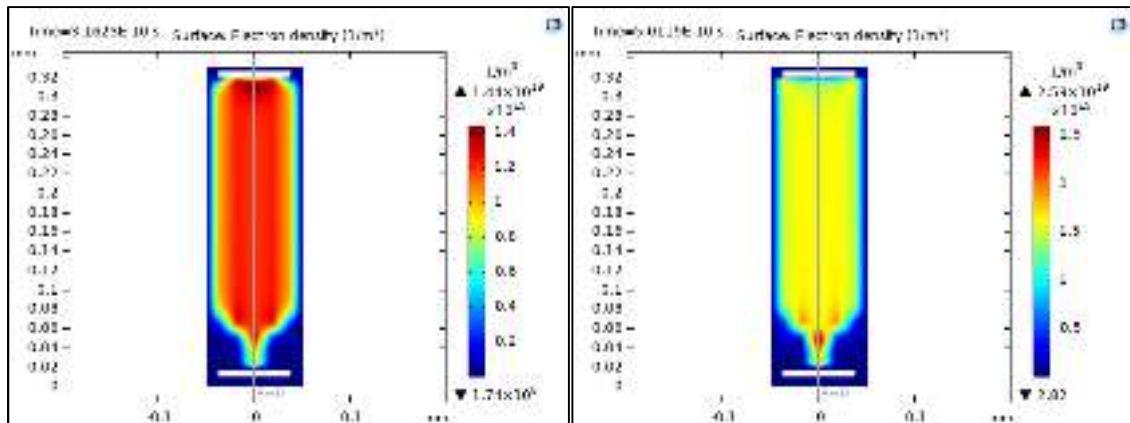
c)66 torr

d)100 torr



e)220 torr

f)760 torr



Şekil 3.21. $d=300 \mu\text{m}$ plazma tüpünde CdSe materyalinin basınçlara göre elektron yoğunluk oluşumları a)22 torr b)44 torr c)66 torr d)100 torr e)220 torr f)760 torr

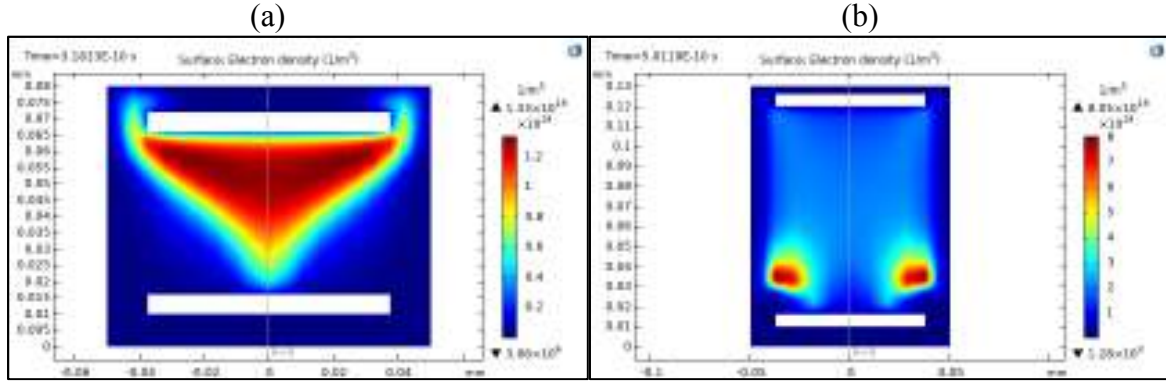
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

DC plazma sistemleri günümüzde farklı uygulamaları olan farklı alanlarda kullanılan sistemlerdir. Plazma sistemleri anot ve katot arasındaki gazın iyonlar, atomlar, iyonize gazlar yardımıyla uyarılması sonucu oluşur. Günümüzdeki DC gaz boşalma ve plazma sistemlerine birçok örnekler vardır. Bunlar ark lambalar, OLED teknolojiler, ince film kaplama sistemler, görüntü çeviriciler, filament lambalar, hızlı çekim yapabilen kameralar, tokamak teknolojiler, füzyon reaktör sistemleri, lazer teknolojiler, dezenfektasyon sistemleri, tarımsal ekipmanlar, tıp teknolojisi, yüzey temizleme sistemleri örnek verilebilir. Plazma sistemleri ile elektromanyetik dalgalar, rf sistemler, füzyon ve parçacık sistemleri, optik alanı birbiriyle etkileşime sokularak farklı sektörlerde farklı yapılar oluşturabiliriz. Şu anda bile yapımına devam edilen sınırsız enerji kaynağı üretimi adı altında oluşturulan tokamak ve füzyon enerjisi, plazmanın ne kadar önemli ve güçlü olduğunu bize kanıtlamaktadır. En önemli plazma kaynağı olan güneş hem yaşamın kaynağı hemde plazmanın çıkış odağı niteliğindedir [32].

Araştırmamızda farklı basınç değerlerinde, farklı katot yarı iletkenler malzemelerde, sabit voltaj değerinde sistemde elektron yoğunluğu, elektron sıcaklığı, uzay yük yoğunluğu, elektron akım yoğunluğu, ikincil elektron katsayısı gibi parametreler simülasyonda yapıldı. Bu sonuçlar araştırmamızın içinde elektron yoğunluğu, uzaysal yük yoğunluğu, elektron akım yoğunluğu ve bunların grafiklerine yer verildi.

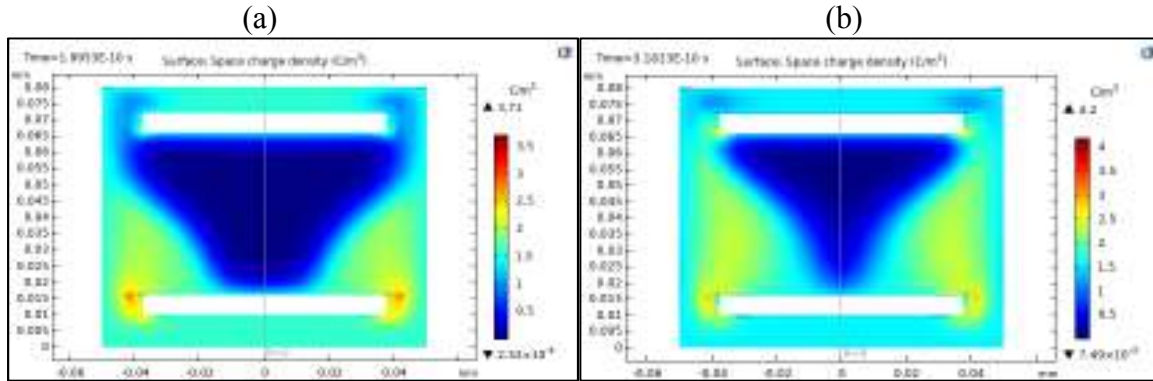
Bu verilerle plazma oluşumda yer alan plazma, akım-voltaj karakteristikleri ve bunun oluşumunda önemli rol oynayan paschen eğrileri farklı katot yarı iletken materyaller çerçevesinde incelendi. Plazma oluşumunda bildiğimiz gibi farklı yarıiletkenlerde plazma bölgelerinde farklı renkler oluşmaktadır.

Çalışmamızda görüldüğü gibi plazma sistemleri ile çok güçlü elektronik devreler, yüksek hızlı chipler, hızlı anakartlar, optimizasyon, veri güvenliği sistemleri, kanser tedavileri, dezenfektasyon sistemleri, ince film kaplama sistemleri, güçlü lazerler daha da geliştirilebilir. Askeri teknolojide kullanılan birçok ekipman, silah ve diğer araçların gelişimine hız kazandırabilir. İlerleyen yıllarda plazma sistemleri geliştirilerek farklı alanlara yönelim gerçekleştirilebilir.



Şekil 4.1. Grafen katotlu Argon gazlı plazma hücresinde $V=2000$ V $p=760$ torr basınçta elektron yoğunlukları a)d=50 μm b)d=100 μm

Plazma hücrelerinin iç yapısında yer alan anot ve katot malzemeleri arasındaki mesafe değiştirilerek gaz ve voltaj uygulanan hücrede farklı oluşumlar görebilmekteyiz. Örnekte olduğu gibi 50 μm 'de elektron yoğunluğunda anottan katoda doğru bir elektron oluşumu ve anot uçlarında hafif bir birikim görebilirken; 100 μm 'de anot ve katot arasında ama katoda daha yakın bir alanda yoğunluk görebilmekteyiz. Bu oluşumlar bize kullanacağımız alanda değişiklik ve farklılık yapma alanı oluşturur. Böylece bu bilimsel alan içinde özgürlük ve hareket alanımızın genişlemiştir.

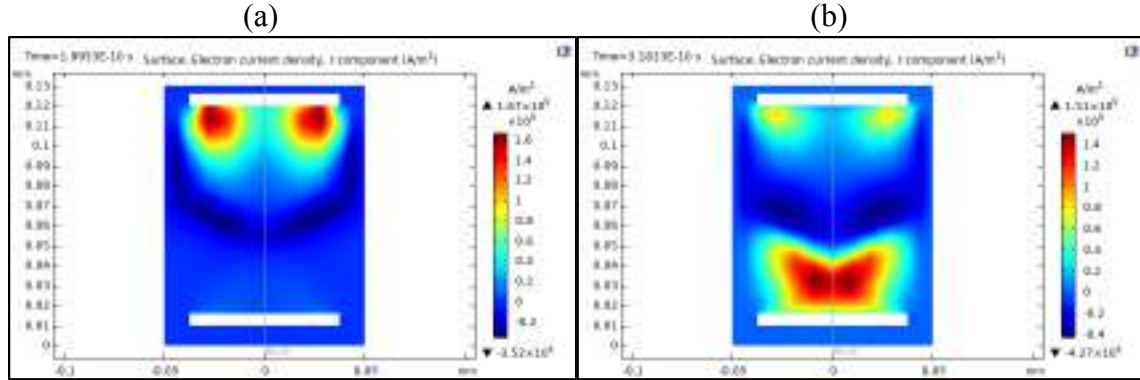


Şekil 4.2. a)ZnSe ve b)GaSb katodlu d=50 μm Argon gazlı plazma hücresinde $p=760$ torr basınçta uzaysal yük yoğunlukları $V=2000$ V

Farklı katot malzemeleri ile oluşturulan plazma hücrelerinde kullanılan katot malzemesinin kendi kimyasal yapısı ve reaksiyon altındaki hareketleri elektronların yönünde sapmalar ve anot-katot arasında farklı uzaysal yük yoğunlukları oluşumunu vermektedir.

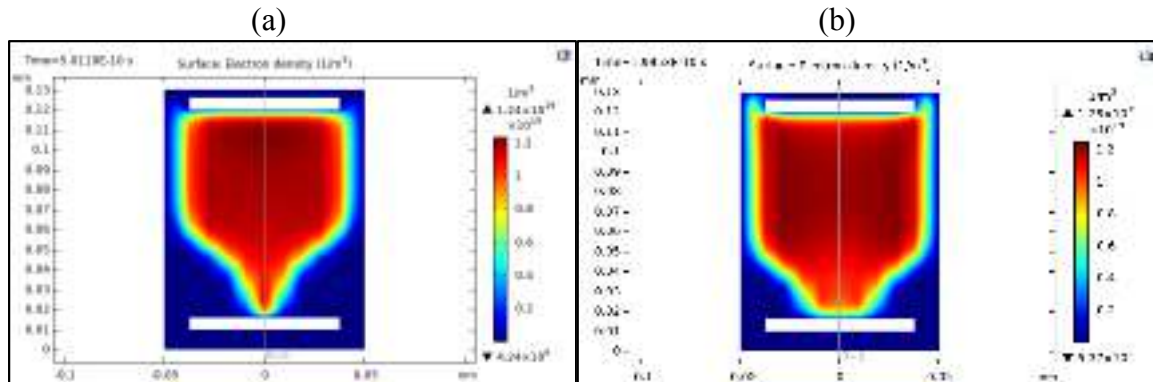
Örnekte olduğu gibi ZnSe [32] malzemesi olan hücrede anot uçlarında biriken elektron potansiyeli katodun merkezinde de oluşmuştur.

Diğer yandan GaSb hücresinde anottan katoda ince şekilde inmektedir. Burada yer alan kırmızı oluşumlar pozitif yük birikimi olurken maviler negatif yük biriktiği yerlerdir.



Şekil 4.3. InGaAs-InP katodlu Argon gazlı plazma hücresinde $V=2000$ V a) $p=22$ torr b) $p=220$ torr basınçta elektron akım yoğunlukları $d=100$ μm

Aynı katot malzemesi aynı katot-anot mesafesi altındaki farklı basınçlar altında oluşturulan plazma hücresinde küçük basınçlar altında pozitif yükler (kırmızı) anodun uçlarına yakın bölgede ve iki parçaya ayrılmış olarak dururken yüksek basınçta katot merkezinde pozitif yüklerin toplandığını görmekteyiz. Atmosfer basıncına yaklaştıkça ideal oluşumların (glow bölgesinde çalışma ile) oluştuğunu ve sonuçlarımızı yapılan deneylerle doğruladığını görmekteyiz.



Şekil 4.4. $d=100$ μm InGaAs-InP katodlu Argon ortamında $p=760$ torr plazma hücresindeki elektron yoğunlukları a) $V=1000$ V b) 2000 V

Elektrotlar (anot ve katot) arasına uygulanan voltaj yeterince artırılırsa akım doyuma ulaşacaktır. Uygulanan voltaj daha da artırılırsa akım katlanarak artacak ve elektronlar nötr bir atomu iyonize etmek için yeterli enerjiye sahip olacaktır. Gereken bu enerji seviyesi voltajın biraz daha artırılmasıyla elektron ve iyon parçacıklarının üretiminde çıkış etkisi yaratacak ve çarpışmalar sonucunda yukarıdaki gibi aynı malzemelerin kullanıldığı plazma hücresinde farklı elektron yoğunluklarının oluşmasını sağlamaktadır.

KAYNAKLAR

1. Rogalski, A. (2002). Infrared detectors: an overview. *Infrared Physics & Technology*, 43(3-5), 187-210.
2. Soloshenko, I. A., Tsiolko, V. V., Khomich, V. A., Shchedrin, A. I., Ryabtsev, A. V., Bazhenov, V. Y. and Mikhno, I. L. (2000). Sterilization of medical products in low-pressure glow discharges. *Plasma Physics Reports*, 26(9), 792-800.
3. Kim, B., Yun, H., Jung, S., Jung, Y., Jung, H., Choe, W. and Jo, C. (2011). Effect of atmospheric pressure plasma on inactivation of pathogens inoculated onto bacon using two different gas compositions. *Food microbiology*, 28(1), 9-13.
4. Schneider, J., Baumgärtner, K. M., Feichtinger, J., Krüger, J., Muranyi, P., Schulz, A., Walker, M., Wunderlich, J. and Schumacher, U. (2005). Investigation of the practicability of low-pressure microwave plasmas in the sterilisation of food packaging materials at industrial level. *Surface and Coatings Technology*, 200(1-4), 962-966.
5. Laroussi, M. and Akan, T. (2007). Arc-free atmospheric pressure cold plasma jets: A review. *Plasma Processes and Polymers*, 4(9), 777-788.
6. Kurt, H. Y., Kalkan, G., Metin, Ö., Tanrıverdi, E., ve Yiğit, D. (2014). Çift gaz boşalma aralıklı plazma hücrelerinde GaAs yarı iletken yüzeyindeki oksitlenmenin sistem karakteristiklerine etkisi. *Politeknik Dergisi*, 17(4), 161-165.
7. Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Desmason, J. and Leprince, P. (2006). Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 61(1), 2-30.
8. Akan, T. (2006). Maddenin 4. Hali Plazma ve Temel Özellikleri. *Elektronik Çağdaş Fizik Dergisi*, 4, 1-10.
9. Fernández, A., Shearer, N., Wilson, D. R. and Thompson, A. (2012). Effect of microbial loading on the efficiency of cold atmospheric gas plasma inactivation of *Salmonella enterica* serovar Typhimurium. *International Journal of Food Microbiology*, 152(3), 175-180.
10. Langmuir, I. (1928). Oscillations in ionized gases. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 14(8), 627-637.
11. Grill, A. (1994). *Cold plasma in materials fabrication*. New York: IEEE Press.
12. Fridman, A. (2008). *Plasma chemistry*. Cambridge: Cambridge University Press.
13. Yangılar, F. ve Oğuzhan, P. (2013). Plazma teknolojilerinin gıda endüstrisinde kullanımı. *Gıda*, 38(3), 183-189.
14. Gökalp, S. M., Aslan, A. ve Öksüz, L. (2012). Plazma teknolojisi ve kullanım alanları. *Deri Bilim*, 6(1), 8-16.

15. Ko, T. S., Yang, S., Hsu, H. C., Chu, C. P., Lin, H. F., Liao, S. C., Lu, T. C., Kuo, H. C., Hsieh, W. F. and Wang, S. C. (2006). ZnO nanopowders fabricated by dc thermal plasma synthesis. *Materials Science and Engineering: B*, 134(1), 54-58.
16. Moisan, M., Barbeau, J., Moreau, S., Pelletier, J., Tabrizian, M. and L'H, Y. (2001). Low-temperature sterilization using gas plasmas: A review of the experiments and an analysis of the inactivation mechanisms. *International Journal of Pharmaceutics*, 226 (1-2), 1-21.
17. Dai, X. J. and Kviz, M. L. (2001, April 1-4). *Study of atmospheric and low pressure plasma modification on the surface properties of synthetic and natural fibres*. Paper presented at the 81st Textile Institute World Conference: An Odyssey in Fibres and Space, Melbourne, Australia.
18. Chen, F. F. and Chang, J. P. (2003). *Lecture notes on principles of plasma processing*. Berlin: Springer Science & Business Media.
19. Akgün, Y., Bölükdemir, A. S., Kurt, E., Öncü, T. ve Alaçakır, A. (2010). Odak-3K cihazıyla plastik iz dedektörleri kullanılarak yapılan plazma odak ölçümleri. *TENMAK raporu*. Ankara.
20. Lieberman, M. A. and Lichtenberg, A. J. (2005). *Principles of plasma discharges and materials processing*. Hoboken: John Wiley & Sons.
21. Dendy, R. O. (Ed.). (1995). *Plasma physics: An introductory course*. Cambridge: Cambridge University Press.
22. Roth, J. R. (1995). Industrial plasma engineering. *Institute of Physics Publishing*, 1, 366-367.
23. Chen, F. F. (2012). *Introduction to plasma physics*. Berlin: Springer Science & Business Media, 490.
24. Bittencourt, J. A. (2013). *Fundamentals of plasma physics*. Berlin: Springer Science & Business Media, 679.
25. Pécseli, H. L. (2013). *Waves and oscillations in plasmas*. Boca Raton: CRC Press, 554.
26. Goldston, R. J. and Rutherford P. H. (2020). *Introduction to plasma physics*. Boca Raton: CRC Press, 510.
27. Matejka, D. and Benko, B. (1989). *Plasma spraying of metallic and ceramic materials*. Hoboken: John Wiley & Sons, 280.
28. Nasser, E. (1971). *Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics*. Hoboken: John Wiley & Sons, 456.
29. Muraoka, K. and Maeda, M. (2016). *Laser-aided diagnostics of plasmas and gases*. Boca Raton: CRC Press.

30. Chabert, P. and Braithwaite, N. (2011). *Physics of radio-frequency plasmas*. Cambridge: Cambridge University Press.
31. Conrads, H. and Schmidt, M. (2000). Plasma generation and plasma sources. *Plasma Sources Science and Technology*, 9(4), 441.
32. Ikhmayies, S. J., & Kurt, H. H. (Eds.). (2021). *Advances in optoelectronic materials*. New York: Springer International Publishing.
33. McDaniel, E. W. (1964). Collision phenomena in ionized gases. *Wiley Series in Plasmas Physics*, 775.
34. Hagelaar, G. J. M. and Pitchford, L. C. (2005). Solving the Boltzmann equation to obtain electron transport coefficients and rate coefficients for fluid models. *Plasma Sources Science and Technology*, 14(4), 722.
35. Kurt, H. H., Tanrıverdi, E. and Salamov, B. G. (2019). Optical and electrical properties of CdS material in a microplasma cell under IR stimulation. *JOM*, 71(2), 644-650.
36. Lieberman, M. A. and Gottscho, R. A. (1994). Design of high-density plasma sources for materials processing. In *Physics of Thin Films*, 18, 1-119.
37. Steger, J. L. and Warming, R. F. (1981). Flux vector splitting of the inviscid gas dynamic equations with application to finite-difference methods. *Journal of Computational Physics*, 40(2), 263-293.
38. Rafatov, I., Bogdanov, E. A. and Kudryavtsev, A. A. (2012). On the accuracy and reliability of different fluid models of the direct current glow discharge. *Physics of Plasmas*, 19(3), 033502.
39. Abroyan, I. A., Ereemeev, M. A. and Petrov, N. N. (1967). Excitation of electrons in solids by relatively slow atomic particles. *Soviet Physics Uspekhi*, 10(3), 332.
40. Hasselkamp, D. (1992). Kinetic electron emission from solid surfaces under ion bombardment. *Particle Induced Electron Emission II*, 1-95.
41. Semnani, A., Venkatraman, A., Alexeenko, A. A. and Peroulis, D. (2013). Pre-breakdown evaluation of gas discharge mechanisms in microgaps. *Applied Physics Letters*, 102(17), 174102.
42. Bogaerts, A., Neyts, E., Gijbels, R. and Van der Mullen, J. (2002). Gas discharge plasmas and their applications. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 57(4), 609-658.
43. Kurt, H. H. and Tanrıverdi, E. (2017). The Features of GaAs and GaP semiconductor cathodes in an infrared converter system. *Journal of Electronic Materials*, 46(7), 4024-4033.

44. Kurt, H. Y., Inalöz, A. and Salamov, B. G. (2010). Study of non-thermal plasma discharge in semiconductor gas discharge electronic devices. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications*, 4, 205-210.
45. Go, D. B. and Pohlman, D. A. (2010). A mathematical model of the modified Paschen's curve for breakdown in microscale gaps. *Journal of Applied Physics*, 107(10), 103303.
46. Hansu, F. (2012). *Bariyer boşalmasındaki akım kararsızlıklarının deneysel ve nümerik analizi*, Yayınlanmamış Doktora Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya.
47. Shockley, W. (1952). Transistor electronics: Imperfections, unipolar and analog transistors. *Proceedings of the IRE*, 40(11), 1289-1313.
48. Arslanbekov, R. R. and Kolobov, V. I. (2003). Two-dimensional simulations of the transition from Townsend to glow discharge and subnormal oscillations. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36(23), 2986.
49. Jamil, M. T., Ahmad, J., Bukhari, S. H., Mazhar, M. E., Nissar, U., RAO, A. J., Ahmad, H. and Murtaza, G. (2017). Atmospheric pressure glow discharge (APGD) plasma generation and surface modification of aluminum and silicon si (100). *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 12(2), 595-604.
50. Kolobov, V. I. and Fiala, A. (1994). Transition from a Townsend discharge to a normal discharge via two-dimensional modeling. *Physical Review E*, 50(4), 3018.
51. Aschwanden, M. J. (2019). *New millennium solar physics*. New York: Springer International Publishing.
52. Linsky, J. L. and Serio, S. (Eds.). (2012). *Physics of solar and Stellar Coronae: GS Vaiana memorial symposium: Proceedings of a conference of the international astronomical union, held in Palermo, Italy, 22–26 June, 1992*. Berlin: Springer Science & Business Media.
53. Ahadi, A. M., Trottenberg, T., Rehders, S., Strunskus, T., Kersten, H. and Faupel, F. (2015). Characterization of a radio frequency hollow electrode discharge at low gas pressures. *Physics of Plasmas*, 22(8), 083513.
54. Mavrodineanu, R. (1984). Hollow cathode discharges: Analytical applications. *Journal of research of the National Bureau of Standards*, 89(2), 143-185.
55. Mihailova, D. (2010). Sputtering hollow cathode discharges designed for laser applications; experiments and theory. *Eindhoven University of Technology*, 1-176.
56. Khane, V. B., Jain, P. K. and Freels, J. D. (2012, January). *COMSOL simulations for steady state thermal hydraulics analyses of ORNL's high flux isotope reactor*. In COMSOL Conference, Boston, 1-14.

57. Sadiq, Y., Kurt, H. Y., Albarzanji, A. O., Alekperov, S. D. and Salamov, B. G. (2009). Transport properties in semiconductor-gas discharge electronic devices. *Solid-State Electronics*, 53(9), 1009-1015.
58. Kurt, H., Koc, E. and Salamov, B. G. (2010). Atmospheric pressure DC glow discharge in semiconductor gas discharge electronic devices. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38(2), 137-141.



GAZİ GELECEKTİR..