
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

YARIİLETKEN MALZEMELERİN BİR MİKROPLAZMA HÜCREDEKİ OPTİK VE ELEKTRİKSEL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Erhan ONGUN

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEMMUZ 2024

ETİK BEYAN

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

- 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 çalışmasında 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.

Erhan ONGUN

25/07/2024

YARIİLETKEN MALZEMELERİN BİR MİKROPLAZMA HÜCREDEKİ OPTİK VE ELEKTRİKSEL DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Erhan ONGUN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2024

ÖZET

Tez çalışmamızda doğru akım (DC) -beslemeli gaz boşalma-yarıiletken mikroplazma (GDSμP) sistemlerinin özellikleri deneysel ve sayısal yöntemler ile ayrıntılı olarak incelendi. Sayısal analiz çalışmaları, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) çözücü COMSOL Multifizik simülasyon programının DC plazma platformunda gerçekleştirildi. Analiz edilen GDSμP sistemlerinin yapısal bileşiminde; çinko selenit (ZnSe), alüminyum galyum antimonid (AlGaSb) ve indiyum galyum arsenit fosfit (InGaAsP) bileşik yarıiletken malzemeler katot olarak, elektriksel iletken görünür bant optik geçirgen indiyum kalay oksit (ITO) ince film kaplı silika (SiO_2) malzeme ise anot olarak kullanıldı. GDSμP sistemleri mikro ölçekte iki boyutlu düzlemsel topolojide dikdörtgen ve eliptik geometriye sahip beş farklı hücre modelinde tasarlandı. Mikroplazma reaktör hücresinde anot-katot elektrotlar arası boşalma aralığı (d) 50 μm ve 100 μm olmak üzere iki farklı değerde modellendi. Mikroplazma reaktör hücresinde plazma süreci, gaz tipi argon (Ar) ve argon/hidrojen (Ar/H_2) ile tanımlandı. Gaz basıncı (P), atmosfer altı seviyede 150 Torr, 200 Torr ve 250 Torr değerlerinde tanımlandı. Hücrenin elektriksel eşdeğer devre modeli, DC besleme şartları altında 1,0 kV, 1,2 kV ve 1,3 kV değerlerinde tanımlandı. Tez çalışmamızda incelenen GDSμP sistemlerinin tanımlanan tüm değişken tasarım parametreleri, analiz edilecek model esas alınarak gerçekleştirilen çok sayıdaki simülasyon çalışmaları neticesinde modele özel olarak belirlendi. GDSμP sistemleri, normal glow DC boşalma modunda çalıştırıldı ve her bir modelin hesaplanan çalışma noktası, Paschen eğrisi üzerinde ve akım-gerilim (I/V) karakteristik grafikleri üzerinde gösterildi. GDSμP sistemlerinin farklı modeller için yapılan simülasyon çalışmaları neticesinde elde edilen; elektron yoğunluğu (ED), elektron akım yoğunluğu (ECD), elektrik potansiyel dağılımı (EPD) ve kapasitif güç depolama (CPD) parametrelerinin uzay-zamansal değişimleri iki boyutlu ve üç boyutlu grafik ortamlarda ayrıntılı olarak analiz edildi. Deneysel ve sayısal analizler neticesinde; grup II-VI ve III-V ikili, üçlü ve dörtlü bileşik yarıiletken malzemelerin basit düzlemsel ya da mikro-desenli düzlemsel elektron emisyon yüzeyli katot elektrot yapılarında argon ya da argon/hidrojen reaktör gaz ortamlarda diğer temel tasarım parametrelerinin uygulanması durumunda; ileri teknoloji endüstriyel, uzay-havacılık ve savunma sanayi uygulamalarına yönelik GDSμP tabanlı kızılötesi (IR) algılama ve görüntü çevirme aygıtlarının modellenmesi için etkili tasarım ve geliştirme araçları olarak kullanılabileceği anlaşılmıştır.

Bilim Kodu : 20219
Anahtar Kelimeler : Kızılötesi, yarıiletken, DC glow gaz deşarj, görüntü çevirici
Sayfa Adedi : 130
Danışman : Prof. Dr. Hatice Hilal YÜCEL

EXAMINATION OF THE OPTICAL AND ELECTRICAL BEHAVIOURS OF SEMICONDUCTORS IN A MICROPLASMA CELL

(Ph. D. Thesis)

Erhan ONGUN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2024

ABSTRACT

In this thesis study, the discharge properties of direct current (DC) gas discharge-semiconductor microplasma (GDSμP) systems were examined in detail using experimental and numerical methods. Numerical analyses were carried out on the DC plasma platform of the finite element method (FEM) solver COMSOL Multiphysics simulation program. In the structural composition of the analyzed GDSμP systems; zinc selenide (ZnSe), aluminum gallium antimonide (AlGaSb) and indium gallium arsenide phosphide (InGaAsP) compound semiconductors, and electrically conductive optically transparent indium tin oxide (ITO) thin film coated silica (SiO_2) substrate were used as cathode and anode electrodes, respectively. GDSμP systems were designed in five different cell models with rectangular and elliptical geometry in two-dimensional planar topology. The interelectrode discharge gaps (d) of the gas reactor chambers were set in 50 μm and 100 μm lengths. Process gas type in the microplasma reactor chamber was defined as argon (Ar) and argon/hydrogen (Ar/H_2) mixtures. Process gas pressure (P) was defined at sub atmospheric pressures at 150 Torr, 200 Torr and 250 Torr. The electrical equivalent circuit model of the cell was defined under DC supply conditions at 1,0 kV, 1,2 kV and 1,3 kV. All variable key design parameters of GDSμP systems have been determined specifically for each model after numerous simulation studies on the relevant models. GDSμP systems were operated in the normal glow DC discharge regime and the calculated operating point of each model was indicated on the Paschen curve and current-voltage (I/V) curve. Spatiotemporal changes of the dynamic discharge parameters, including electron density (ED), electron current density (ECD), electric potential distribution (EPD) and capacitive power deposition (CPD) were analyzed in detail in two-dimensional and three-dimensional graphical media. It is figured out that cathode materials of binary, ternary and quaternary compound semiconductors in groups II-VI and III-V with simple planar or micro-digitated electron emission surfaces, process gasses of unary argon or binary argon/hydrogen mixtures in various ratios, and the other customizable design parameters can all be effectively utilized as design and development tools for modeling the GDSμP -based infrared sensing and visible image conversion devices for high-end industrial, aerospace and defense applications.

Science Code	:	20219
Key Words	:	Infrared, semiconductor, DC glow gas discharge, infrared converter
Page Number	:	130
Supervisor	:	Prof. Dr. Hatice Hilal YÜCEL

TEŞEKKÜR

Danışman hocam Prof. Dr. Hatice Hilal YÜCEL'e ders ve tez dönemlerinde verdiği çok kıymetli destekleri, mikroplazma fiziği alanındaki akademik katkıları, teorik ve deneysel çalışmalarımızdaki yardımları ve rehberliği dolayısı ile çok teşekkür ederim. Gazi Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne FDK-2023-8704 kodlu proje ile laboratuvar çalışmalarımıza desteklerinden dolayı teşekkür ederim. Fizik Ana Bilim Dalı doktora öğrencisi Selçuk UTAŞ'a mikroplazma modelleme ve simülasyon çalışmalarımda verdiği katkılardan dolayı teşekkür ederim. Kıymetli aileme her daim verdikleri destek ve motivasyon için teşekkür ederim. Akademik çalışmalarımda bugüne kadar emeği ve desteği olan tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

RESİMLERİN LİSTESİ xvi

SİMGELER VE KISALTMALAR xvii

1. GİRİŞ 1

1.1. Mikroplazma Bilimi, Teknolojileri ve Uygulama Alanları 3

1.2. Gaz Boşalma-Yarıiletken Mikroplazma Teknolojisi 4

1.3. Gazlarda Elektriksel Kırılım (Breakdown) 4

1.4. Paschen Eğrisi 6

1.5. Gazlarda İyonizasyon Reaksiyonları 8

1.6. DC Gaz Deşarj Rejimleri (V/I grafiği) 8

1.7. Kızılötesi Yarıiletken Malzemeler 9

1.7.1. Çinko selenit (ZnSe) 11

1.7.2. Alüminyum galyum antimonid (AlGaSb) 12

1.7.3. İndiyum galyum arsenit fosfit (InGaAsP) 13

1.8. Elektrot Yapıları 15

2. ARAŞTIRMA YÖNTEMİ 17

2.1. Deneysel Araştırma Yöntemi 17

2.1.1. Mikroyapı ve elementel analiz 17

Sayfa

2.1.2. Optik analiz 17

2.1.3 Mikroplazma analizi 18

2.1.4. Elektriksel analiz 18

2.2. Simülasyon Araştırma Yöntemi 19

2.2.1. Teorik çerçeve 20

2.2.2. Gaz boşalma parametreleri 20

2.2.3. Simülasyon model parametreleri 23

2.2.4. Simülasyon modellerinin fiziksel özellikleri 24

3. ARAŞTIRMA BULGULARI 27

3.1. Deneysel Araştırma Bulguları 27

3.1.1. Çinko selenit (ZnSe)-argon (Ar) mikroplazma sistemi 27

3.2. Simülasyon Araştırma Bulguları 35

3.2.1. Simülasyon analiz çalışması (SİM-1) 35

3.2.2. Simülasyon analiz çalışması (SİM-2) 51

3.2.3. Simülasyon analiz çalışması (SİM-3) 67

3.2.4. Simülasyon analiz çalışması (SİM-4) 83

3.2.5. Simülasyon analiz çalışması (SİM-5) 99

4. SONUÇ VE ÖNERİLER 117

KAYNAKLAR 121

ÖZGEÇMİŞ 129

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 1.1. Elektron–argon çarpışma iyonizasyon reaksiyonları 8

Çizelge 1.2. Argon alan ve sınır reaksiyonları..... 8

Çizelge 2.1. GDSμP reaktör hücresinin fotokatot özellikleri 24

Çizelge 2.2. GDSμP reaktör hücresinin yapısal özellikleri 24

Çizelge 2.3. GDSμP reaktör hücresinin gaz özellikleri 24

Çizelge 3.1. SİM-1 simülasyon çalışmasına ait parametre tanımları..... 35

Çizelge 3.2. SİM-1 simülasyon çalışmasına ait sonuç verileri 49

Çizelge 3.3. SİM-2 simülasyon çalışmasına ait parametre tanımları..... 51

Çizelge 3.4. SİM-2 simülasyon çalışmasına ait sonuç verileri 65

Çizelge 3.5. SİM-3 simülasyon çalışmasına ait parametre tanımları..... 67

Çizelge 3.6. SİM-3 simülasyon çalışmasına ait sonuç verileri 81

Çizelge 3.7. SİM-4 simülasyon çalışmasına ait parametre tanımları..... 83

Çizelge 3.8. SİM-4 simülasyon çalışmasına ait sonuç verileri 97

Çizelge 3.9. SİM-5 simülasyon çalışmasına ait parametre tanımları..... 99

Çizelge 3.10. SİM-5 simülasyon çalışmasına ait sonuç verileri 113

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Elektron emisyon mekanizmaları 5

Şekil 1.2. Paschen eğrisi 7

Şekil 1.3. Paschen eğrileri (He, Ne, Ar, H_2, N_2) 7

Şekil 1.4. DC gaz deşarj rejimleri (V/I grafiği) 9

Şekil 1.5. Görünür-kızılötesi dalga boyu spektral bant aralığı 10

Şekil 1.6. CdSe, ZnSe ve ZnTe elektronik bant yapısı 12

Şekil 1.7. III-As ve III-Sb elektronik bant yapısı..... 13

Şekil 1.8. $GaAs_{1-y}P_y$, $In_xGa_{1-x}As$ ve $In_xGa_{1-x}As_{1-y}P_y$ elektronik bant yapısı..... 14

Şekil 2.1. GDSS deneysel hücre modülü şematik görsel..... 18

Şekil 2.2. GDSS elektriksel ölçüm devre düzeneği 19

Şekil 2.3. GDSS elektriksel eşdeğer devre modeli (R_s=1.0 kΩ, C_p=1.0 pF) 20

Şekil 2.4. Gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma (GDSμP) modülü 21

Şekil 2.5. Fotokatot çalışma prensibi..... 23

Şekil 2.6. Kızılötesi-görünür dalga boyu çevirici modülü..... 23

Şekil 2.7. Dikdörtgen geometrili GDSμP hücrenin fiziksel ve simülasyon ağ yapısı.... 25

Şekil 2.8. Eliptik geometrili GDSμP hücrenin fiziksel ve simülasyon ağ yapısı 27

Şekil 3.1. ZnSe yarıiletken numuneye ait EDAX grafiği 27

Şekil 3.2. ZnSe yarıiletken numuneye ait kızılötesi absorpsiyon grafiği 29

Şekil 3.3. ZnSe-Ar modülünün yakın/kısa dalga kızılötesi radyasyon şiddetine bağlı akım-gerilim grafiği: (a) 760 Torr Ar (b) 66 Torr Ar..... 30

Şekil 3.4. ZnSe-Ar (760 Torr) simülasyon EPD grafiği (a) sekans (b) son..... 32

Şekil 3.5. ZnSe-Ar modülünün kızılötesi radyasyon şiddeti-gerilim grafiği (a) 760 Torr Ar (b) 66 Torr Ar 34

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.6. SİM-1 1D-$ED_{sekans\text{-}başlangıç}$ Ar (a) basit (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot 36

Şekil 3.7. SİM-1 1D-ED_{sekans} Ar (a) basit (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot 37

Şekil 3.8. SİM-1 2D-$ED_{sekans\text{-}son}$ Ar (a) basit (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot 38

Şekil 3.9. SİM-1 3D-$ED_{sekans\text{-}son}$ Ar (a) basit (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot 39

Şekil 3.10. SİM-1 1D-ECD_{sekans} Ar (a) basit (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot 40

Şekil 3.11. SİM-1 2D-$ECD_{sekans\text{-}son}$ Ar (a) basit (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot 41

Şekil 3.12. SİM-1 3D-$ECD_{sekans\text{-}son}$ Ar (a) basit (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot 42

Şekil 3.13. SİM-1 1D-EPD_{sekans} Ar (a) basit (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot 43

Şekil 3.14. SİM-1 2D-$EPD_{sekans\text{-}son}$ Ar (a) basit (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot 44

Şekil 3.15. SİM-1 3D-$EPD_{sekans\text{-}son}$ Ar (a) basit (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot 45

Şekil 3.16. SİM-1 1D-CPD_{sekans} Ar (a) basit (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot 46

Şekil 3.17. SİM-1 2D-$CPD_{sekans\text{-}son}$ Ar (a) basit (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot 47

Şekil 3.18. SİM-1 3D-$CPD_{sekans\text{-}son}$ Ar (a) basit, (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot 48

Şekil 3.19. SİM-1 Ar-Paschen çalışma bölgesi (1,0 Torr.cm) 50

Şekil 3.20. SİM-2 1D-$ED_{sekans\text{-}başlangıç}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 52

Şekil 3.21. SİM-2 1D-ED_{sekans} mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 53

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.22. SİM-2 2D-$ED_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 54

Şekil 3.23. SİM-2 3D-$ED_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 55

Şekil 3.24. SİM-2 1D-ECD_{sekans} mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 56

Şekil 3.25. SİM-2 2D-$ECD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 57

Şekil 3.26. SİM-2 3D-$ECD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 58

Şekil 3.27. SİM-2 1D-EPD_{sekans} mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 59

Şekil 3.28. SİM-2 2D-$EPD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 60

Şekil 3.29. SİM-2 3D-$EPD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 61

Şekil 3.30. SİM-2 1D-CPD_{sekans} mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 62

Şekil 3.31. SİM-2 2D-$CPD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 63

Şekil 3.32. SİM-2 3D-$CPD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 64

Şekil 3.33. SİM-2 Ar/H_2-Paschen çalışma bölgesi (1,0 Torr.cm) 66

Şekil 3.34. SİM-3 1D-$ED_{sekans-başlangıç}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 68

Şekil 3.35. SİM-3 1D-ED_{sekans} mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 69

Şekil 3.36. SİM-3 2D-$ED_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 70

Şekil 3.37. SİM-3 3D-$ED_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2 71

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.38. SİM-3 1D-ECD_{sekans} mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 72

Şekil 3.39. SİM-3 2D-$ECD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 73

Şekil 3.40. SİM-3 3D-$ECD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 74

Şekil 3.41. SİM-3 1D-EPD_{sekans} mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 75

Şekil 3.42. SİM-3 2D-$EPD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 76

Şekil 3.43. SİM-3 3D-$EPD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 77

Şekil 3.44. SİM-3 1D-CPD_{sekans} mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 78

Şekil 3.45. SİM-3 2D-$CPD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 79

Şekil 3.46. SİM-3 3D-$CPD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 80

Şekil 3.47. SİM-3 Ar/H_2-Paschen çalışma bölgesi (2,5 Torr.cm) 82

Şekil 3.48. SİM-4 1D-$ED_{sekans-başlangıç}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 84

Şekil 3.49. SİM-4 1D-ED_{sekans} mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 85

Şekil 3.50. SİM-4 2D-$ED_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 86

Şekil 3.51. SİM-4 3D-$ED_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 87

Şekil 3.52. SİM-4 1D-ECD_{sekans} mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 88

Şekil 3.53. SİM-4 2D-$ECD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 89

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.54. SİM-4 3D-$ECD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2 90

Şekil 3.55. SİM-4 1D-EPD_{sekans} mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2 91

Şekil 3.56. SİM-4 2D-$EPD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2 92

Şekil 3.57. SİM-4 3D-$EPD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2 93

Şekil 3.58. SİM-4 1D-CPD_{sekans} mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2 94

Şekil 3.59. SİM-4 2D-$CPD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2 95

Şekil 3.60. SİM-4 3D-$CPD_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2 96

Şekil 3.61. SİM-4 Ar/H_2-Paschen çalışma bölgesi (1,5 Torr.cm) 98

Şekil 3.62. SİM-5 1D-$ED_{sekans-başlangıç}$ basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2 100

Şekil 3.63. SİM-5 1D-ED_{sekans} basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2 101

Şekil 3.64. SİM-5 2D-$ED_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2 102

Şekil 3.65. SİM-5 3D-$ED_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2 103

Şekil 3.66. SİM-5 1D-ECD_{sekans} basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2 104

Şekil 3.67. SİM-5 2D-$ECD_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2 105

Şekil 3.68. SİM-5 3D-$ECD_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2 106

Şekil 3.69. SİM-5 1D-EPD_{sekans} basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2 107

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.70. SİM-5 2D-EPD$_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 108

Şekil 3.71. SİM-5 3D-EPD$_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 109

Şekil 3.72. SİM-5 1D-CPD$_{sekans}$ basit düzlemsel InGaAsP katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 110

Şekil 3.73. SİM-5 2D-CPD$_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 111

Şekil 3.74. SİM-5 3D-CPD$_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot
(a) Ar (b) Ar/H_2 112

Şekil 3.75. SİM-5 Ar/H_2-Paschen çalışma bölgesi (2,5 Torr.cm) 114

Şekil 4.1. Ar ve Ar/H_2 sistemlerin DC normal glow deşarj çalışma bölgesi (V/I) 118

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. GDSS laboratuvar deney düzeneği..... 17

Resim 3.1. ZnSe numuneye ait AFM görüntüleri..... 28

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
λ	Dalga boyu
mm	Milimetre
µm	Mikrometre
nm	Nanometre
P	Basınç
Torr	Basınç birimi (mmHg)
d	Elektrotlar arası boşluk
T	Hücre çalışma ortam sıcaklığı (Kelvin)
I	Akım (Amper)
V	Gerilim (Volt)
Ar	Argon
H_2	Hidrojen
Si	Silikon
Ge	Germanyum
GaAs	Galyum arsenit
GaSb	Galyum antimonit
GaP	Galyum fosfit
CdSe	Kadmiyum selenit
ZnSe	Çinko selenit
ZnTe	Çinko tellür
HgCdTe	Civa kadmiyum tellür
AlSb	Aluminyum antimonit
AlGaSb	Alüminyum galyum antimonid
InAs	Indiyum arsenit
InGaAsP	Indiyum galyum arsenit fosfit

Simgeler	Açıklamalar
SiO_2	Silika
SnO_2	Kalay oksit
Ag	Gümüş
Au	Altın

Kısaltmalar	Açıklamalar
GDSS	Gaz deşarj-yarıiletken sistemi
GDSμP	Gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma sistemi
IR	Kızılötesi (KÖ)
NIR	Yakın dalga kızılötesi
SWIR	Kısa dalga kızılötesi
MWIR	Orta dalga kızılötesi
LWIR	Uzun dalga kızılötesi
VIS	Görünür ışık
TA	Townsend çığı
TE	Termiyonik emisyonu
SEE	İkincil elektron emisyonu
FE	Alan elektron emisyonu
EEDF	Elektron enerji dağılım fonksiyonu
EDAX	Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi
AFM	Atomik kuvvet mikroskobu
FEM	Sonlu elemanlar yöntemi
ED	Elektron yoğunluğu
ECD	Elektron akım yoğunluğu
EPD	Elektrik potansiyel dağılımı
CPD	Kapasitif güç depolama
NFPA 704	Standard System for the Identification of the Hazards of Materials for Emergency
ITO	İndiyum kalay oksit

1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında kızılötesi foto algılayıcı ve görüntü çevirici teknolojisi pek çok potansiyel uygulama alanında kullanılmakta olup, sürekli gelişmekte olan katma değeri yüksek teknolojik bir alan olarak karşımıza çıkmaktadır. Kızılötesi foto algılayıcı, görüntü yoğunlaştırıcı ve çevirici sistemlerinin bazı potansiyel kullanım alanları şunlardır:

1) Isı kaynaklarının tespit edilmesinde (savunma sanayi uygulamaları)
2) Lazer kaynak spektrofotometrik proses izleme (endüstriyel uygulamalar)
3) Lazer ışın profil analizi
4) Yangın erken tespit ve uyarı sistemleri (Örnek; T=800 K; λ=3.62 μm duyarlı)
5) Arama ve kurtarma faaliyetlerinde
6) Gaz absorpsiyon spektroskopisi (numune test ve analiz çalışmalarında)
7) Tahribatsız test ve muayene işlemlerinde)

Tez çalışmamız ile ülkemizin bu teknolojide mevcut endüstriyel, çevresel ve savunma sanayi uygulama alanlarındaki ihtiyaçlarına alternatif yerli çözümler bulmak, prototip odaklı araştırma ve geliştirme çalışmaları yapmak, teorik ve deneysel bilgi birikimine katkı sağlamak hedeflenmiştir. Uygulamalı deneysel veri tabanına, kızılötesi-görünür dalga boyu görüntü yoğunlaştırıcı ve dönüştürücü mikro aygıt teknolojilerinin tasarım ve modelleme çalışmalarında yeni kavramsal yaklaşımların geliştirilmesinde ve farklı uygulama alanlarına yönelik yeni malzemelerin tasarımında bilgi yoğun katkı sağlamaktır.

Prof. Dr. Hatice Hilal YÜCEL liderliğinde Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü Mikroplazma Bilimsel Araştırma ve Uygulama laboratuvarında yürütülen pek çok sayıda teorik ve deneysel çalışmanın neticesinde oluşmuş geniş bir veri tabanı mevcuttur.

Tez kapsamında yürütülen araştırma ve geliştirme çalışmalarımızın amacı; GDSμP sisteminin karakteristik gaz boşalma özelliklerini kontrol ederek, mikroplazma tabanlı yapay elektromanyetik malzemeleri yüksek verimli kızılötesi-görünür dalga boyu dönüştürücü mikro aygıt uygulamaları için tasarlamaktır. Modelleme, simülasyon ve sayısal analiz çalışmaları neticesinde, GDSμP sistemlerinde gaz boşalma dinamik parametrelerinin uzay-zamansal değişimleri hakkında deneysel yöntemle elde

edemediğimiz önemli veriler sağlamaktır. Amacımız, düşük enerjili ve az sayıdaki kızılötesi spektrumdaki fotonları tespit etmek ve yüksek enerjili ve yüksek sayıdaki görünür spektrumdaki fotonlara dönüştürmektir. Bu nedenle kızılötesi spektrumda yüksek duyarlılığa sahip ve aynı zamanda oda sıcaklığında soğutma ünitesi olmaksızın çalışabilen ve optoelektronik endüstrisinde geniş bir yelpazede uygulama alanına sahip olan çinko selenit (ZnSe), aluminyum galyum antimonid (AlGaSb) ve indiyum galyum arsenit fosfit (InGaAsP) gibi bileşik yarıiletken malzemeler ile mikroplazma hücresindeki plazma karakterizasyonu sayısal analiz ve deneysel yöntemler ile araştırılmıştır.

Tezin konusu ve kapsamı, kızılötesi görüntü çevirici olarak tasarlanacak ve modellenecek olan "gaz boşalma-yarıiletken mikroplazma sisteminin" özellikle 780–1700 nm yakın/kısa dalga kızılötesi spektral bant aralığında çalışma performansının arttırılmasına yönelik teorik ve deneysel çalışmaları içermektedir.

Tez çalışmamızdaki araştırma faaliyetleri; kızılötesi foto algılayıcı ve görünür dalga boyuna ait çevirici modülünün çalışma performans parametrelerinin yarıiletken fotokatot tabanlı geliştirilmesine yönelik tasarım, modelleme ve sayısal analiz ile simülasyon çalışmalarını da içeren deneysel çalışmalarımızı kapsamaktadır. Mevcut çalışmalarda; yarıiletken fotokatot malzemenin kızılötesi penceresine elektriksel kontak olarak 40 nm kalınlığında altın ince-film kaplandığı rapor edilmektedir. Altın ince-filmin işlevi, kızılötesi spektral bantta optik olarak geçirgen özellikte olmakla beraber elektriksel olarak iletken özellikte bir kontak penceresi oluşturmaktır. Tez çalışmamızda, yeni bir yaklaşım olarak, katot elektron emisyon yüzeyinin kontrol edilmesi amacıyla mikro-desenlenmiş yüzeye sahip yarıiletken katot modelleme ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Katot elektron emisyon yüzey alanının arttırılması amaçlanmıştır. Diğer bir araştırma ve geliştirme faaliyet alanımız; argon ve hidrojen gazlarını belli oranlarda karıştırarak elde edilen ikili gaz karışımının elektriksel deşarj parametreleri ve GDSμP reaktörünün çalışma noktasındaki etkileri incelenmiştir. Kızılötesi foto algılayıcı ve görünür dalga boyu çevirici mikroplazma hücresinin çalışma performansını ve anot penceresinden çıkan ışıma şiddetinin ölçüm ve analizine yönelik deneysel çalışmalarımızda ZnSe yarıiletken malzeme katot olarak kullanılmıştır.

Plazma teknolojisinde iki farklı tipte plazma tekniği kullanılmaktadır; (1) termal plazma ve (2) soğuk ya da dengesiz plazma tekniğidir. Birincisi, doğru ya da alternatif akım veya mikrodalga kaynaklarıyla yüksek basınçlarda üretilir ve esas olarak toksik maddeleri yok

etmek veya kalın film kaplamalar oluşturmak için kullanılır. İkincisi, vakum koşulları altında, elektron sıcaklığı ile karakterize edilen, düşük güçlü doğru akım veya mikrodalga kaynakları tarafından üretilir ve esas olarak mikro ölçekli topografik değişiklikler yapmak için malzemelerin yüzey modifikasyonları, çeşitli nano malzemelerin yüzey işlevselleştirilmesi, yapay yüzey kimyasalları için ve ince film kaplama üretiminde kullanılır [1]. Gıda ve tarımdaki endüstriyel işlemler için soğuk plazmalar [2], tıbbi uygulamalar [3], biyomedikal uygulamalar için düşük sıcaklıklı plazma jeti [4], tıp ve hijyen uygulamalarına yönelik plazma biyobilimi [5] ve yarıiletken teknolojileri [6] dahil olmak üzere plazma bilimi ve teknolojisinin çeşitli uygulama alanlarında teorik ve deneysel araştırma çalışmaları rapor edilmiştir.

1.1. Mikroplazma Bilimi, Teknolojileri ve Uygulama Alanları

Plazma bilimi ve teknolojisine artan ilginin odağı haline gelen mikroplazmalar, mikrometre aralığında en az bir fiziksel boyuta sahip, termal olmayan, yüksek enerji yoğunluklu ve kararsız reaktif gaz boşalma ortamlarıdır. Mikroplazmalar, atmosfer altı veya atmosferik basınçlardaki gazların elektriksel deşarjı ile üretilir. Mikroplazma bilimi ve teknolojisi alanında yayınlanan güncel bir inceleme, uygulama örnekleriyle birlikte mikroplazma araştırmasına ilişkin kapsamlı bir durum raporu sunmaktadır [7].

Çok amaçlı ışık kaynakları, fotokimyasal malzeme işleme için etkin morötesi (UV) ışık kaynakları, spektroskopik malzeme analizi, yüzey dezenfeksiyonu, su arıtma, mikroplazma-optik tabanlı yapay elektromagnetik aygıtlar [8] dahil olmak üzere, mikroplazma alan etkili transistörler [9], elektrikli mikro itiş için minyatür plazma kaynakları [10], mikro yanmada alan emisyonlu deşarjlar [11], X-bant mikrodalgaları tarafından beslenen mikroplazma iticisi [12] ve mikroplazma teknoloji tabanlı fonksiyonel nano malzeme sentezi [13] gibi gelişmiş malzeme ve aygıtlar için mikroplazma bilimi ve teknolojisi alanında pek çok araştırma çalışması rapor edilmiştir. Elektriksel ve optik özellikleri mikroplazmaları, kızılötesi foto algılama ve görünür dalga boyuna çevirme uygulamaları alanında gaz deşarj-yarıiletken aygıtların tasarımı için çekici kılmaktadır [14,15].

Düşük basınçlı helyum plazmalarındaki spektral ışık emisyonlarının yoğunluğundan belirlenebilen elektron enerji dağılım fonksiyonunun (EEDF), gaz deşarj sisteminin özelliklerini ortaya koyan değerli bilgiler taşıdığı bildirilmektedir [16].

Karakteristik glow deşarj ışık emisyonlarının (GDIE) analizleri ve hızlı değişen plazma süreçlerinde gaz boşlama ışık emisyon yoğunluğunun (DEY) gaz ortamındaki akıma bağımlılığı, mikroplazma sistemini tanımlamak için büyük önem taşımaktadır [17]. Mikroplazma sistemleri, mikro ölçekte plazma oluşumunun uzay-zamansal dinamiklerinin ileri düzeyde karakterizasyonunu gerektirir.

1.2. Gaz Boşalma-Yarıiletken Mikroplazma Teknolojisi

Gaz boşalma-yarıiletken optoelektronik aygıtlarda elektriksel yük taşıma özelliklerinin araştırılması için düzlemsel elektrotlu doğru akım gaz boşalma-yarıiletken mikroplazma (GDSμP) sistemlerinde [18, 19] çeşitli teorik ve deneysel çalışmalar rapor edilmiştir.

Galyum arsenit (GaAs) ve galyum fosfit (GaP) yarıiletken malzemelerin elektriksel ve optik özellikleri, kızılötesi-görünür dalga boyu çevirici sistemler için rapor edilmiştir [20, 21]. GaAs, GaP ve ZnSe yarıiletken-argon mikro glow plazmaları konusunda deneysel çalışmalar rapor edilmiştir [22]. GaAs yarıiletken elektrot yüzeyindeki oksidasyonun mikroplazma kızılötesi görüntü dönüştürücü sistem üzerindeki etkisi rapor edilmiştir [23].

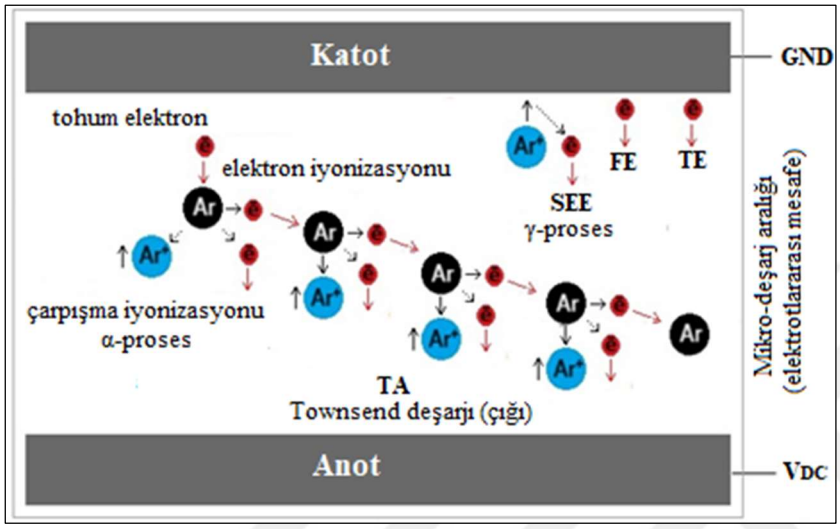
Gaz boşalma-yarıiletken mikroplazma sisteminde ZnS ve ZnSe yarıiletken malzemelerin elektriksel özellikleri incelenmiştir [24]. ZnSe yarıiletken malzemenin kızılötesi foto duyarlılığı deneysel olarak incelenmiştir [25]. Kızılötesi optik uyarım altındaki bir yarıiletken-mikroplazma sisteminde CdS yarıiletkenin optik ve elektriksel özellikleri rapor edilmiştir [26].

InP fotokatot ile akuple edilmiş hava ve helyumdan oluşan gaz boşalma ortamında elektron yoğunluğu, elektrik potansiyeli ve elektriksel kırılım gerilimi konusunda deneysel araştırma ve FEM analizi rapor edilmiştir [27].

1.3. Gazlarda Elektriksel Kırılım (Breakdown)

Makrodan mikro ölçeğe kadar gazlarda elektriksel kırılım olayı üzerine detaylı bir araştırma raporu sunulmuştur [28]. Gazlarda gelişen elektriksel kırılım süreci, termoiyonik elektron emisyonu, iyon kaynaklı ikincil elektron emisyonu ve alan elektron emisyonu dahil olmak üzere çeşitli elektron emisyon mekanizmaları tarafından yönetilir.

Mikro boşalma aralığı boyunca geçekleşen elektron emisyon mekanizmaları ve Townsend çığ oluşumu arasındaki geçişler Şekil 1.1'de tanıtılmıştır. Basit düzlemsel anot/katot elektrotlu bir gaz boşalma ortamındaki elektriksel kırılım süreci, elektron emisyonu ve iyonizasyon mekanizmalarının birleşimi yoluyla Townsend elektron çığ reaksiyonları tarafından yönetilir [29].



Şekil 1.1. Elektron emisyon mekanizmaları [29]

TA : Townsend çığı
TE : Termiyonik emisyonu
SEE : İkincil elektron emisyonu
FE : Alan emisyonu

SEE katsayısı, γ_{SE}, TA katsayısı α, mikro boşalma aralığı d boyunca gerçekleşen iyonizasyon reaksiyonları ile bağlantılı olup Eşitlik 1.1'de tanımlanmıştır:

$$\exp(\alpha.d) - 1 = \gamma_{SE}^{-1} \quad (1.1)$$

Katot ile etkileşimli iyon kaynaklı ikincil elektron emisyonunda, γ_{SE} katsayısına γ' katkısı Eşitlik 1.2'de tanımlanmıştır:

$$\exp(\alpha.d) - 1 = (\gamma_{SE} + \gamma') - 1 \quad (1.2)$$

α: Birim uzunlukta elektron başına üretilen iyon sayısına eşit iyonlaşma katsayısı.

Elektriksel olarak pozitif yüklü α iyonları, yüksek gerilim altında katota doğru hızlandırılır ve çarpışma sonrasında katot elektrot yüzeyinden kopan ikincil elektronlar mikro boşluğa geçer.

d: Gaz boşalma aralığı.

γ_{SE}: İkincil elektron emisyonu (SEE) katsayısı, katot civarında biriken pozitif yüklerin etkisi ile katot yüzeyinden kopan elektron emisyonunun olasılığını tanımlar.

SEE katsayısının gaz ortamın elektriksel kırılım mekanizmasını yönlendirmede önemli bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. İyonla güçlendirilmiş alan emisyonuna dayalı mikro ölçekli elektriksel kırılım mekanizması ve modifiye Paschen eğrisi rapor edilmiştir [30].

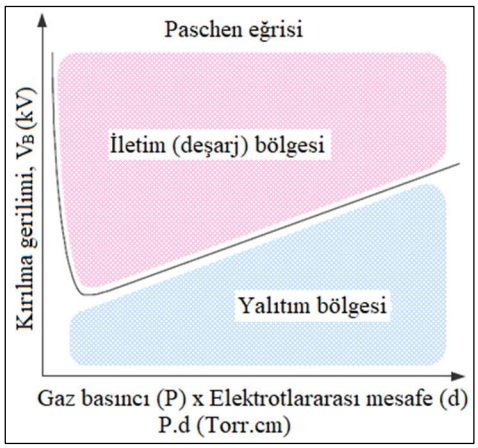
Teorik ve hesaplamalı teknikler, mikro ölçekli boşluklardaki gazların elektriksel kırılım olayını anlamamıza yardımcı olmaktadır. FEM çözücü tabanlı uzay-zaman simülasyon programı, gaz boşalma parametrelerini tahmin etmek ve elektriksel kırılım durumlarının geçici analizini gerçekleştirmek için yararlı bir sanal laboratuvar aracıdır.

Mikro ölçekli boşluklardaki hızlı geçiş elektriksel deşarj durumlarını sayısal olarak analiz etmek için gaz ortamın elektriksel kırılım mekanizmalarına yönelik bu denklemlerin analitik çözümlerini içeren teorik ve hesaplamalı farklı yöntemler de rapor edilmiştir [31].

1.4. Paschen Eğrisi

Şekil 1.2'de gaz ortamda iletim (deşarj) ve yalıtım (kesim) bölgelerini tanımlayan Paschen eğrisi verilmiştir [9]. Paschen çarpanı ($P.d$), gaz basıncı (P) ve elektrotlar arası mesafe ya da deşarj boşluğu (d) ile tanımlanmaktadır. Paschen çarpanı, gaz ortamın elektriksel kırılım gerilimini (V_{DC}) belirlemektedir.

Her gaz, Paschen çarpanına tekabül eden karakteristik bir elektriksel kırılım gerilimine ve özel bir Paschen eğrisine sahiptir.

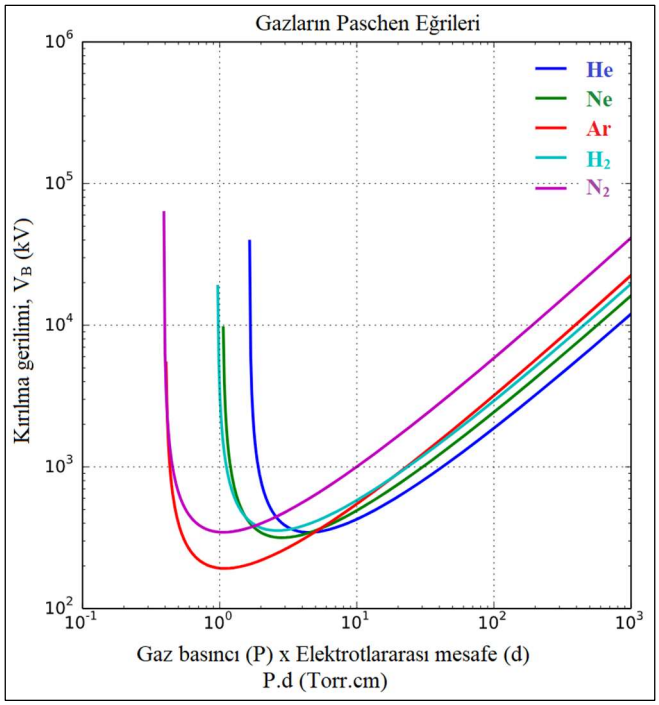


Şekil 1.2. Paschen eğrisi

Büyük *P.d* değerlerinde gaz boşalma aralığındaki çarpışmaların sayısı da fazladır. Küçük *P.d* değerlerinde plazma bölgesindeki çarpışmalar çok az olduğundan elektriksel kırılım gerilimi artar. Küçük *P.d* için sınırlayıcı değer Eşitlik 1.3'te tanımlanmıştır:

$$P.d = A\text{-}1 \ln (1+1/\delta_{sec}) \quad (1.3)$$

Bu değerin altında elektriksel kırılım gerçekleşmez, burada A bir sabittir ve δ_{sec} ikincil elektron emisyon katsayısıdır. Şekil 1.3'te He, Ne, Ar, H_2, N_2 gazlarının iletim (deşarj) ve yalıtım (kesim) bölgelerini tanımlayan Paschen eğrileri verilmiştir [9].



Şekil 1.3. Paschen eğrileri (He, Ne, Ar, H_2, N_2)

1.5. Gazlarda İyonizasyon Reaksiyonları

Çizelge 1.1'de elektron–argon çarpışma iyonizasyon reaksiyonları verilmiştir [32]. Çizelge 1.2'de argon alan ve sınır reaksiyonları tanımlanmıştır.

Çizelge 1.1. Elektron–argon çarpışma iyonizasyon reaksiyonları [32]

No:	Reaksiyon formülü:	İyonizasyon tipi:	Δϵ (eV):	İyonizasyon adı:
1	$e + Ar \longrightarrow e + Ar$	Elastik	0	Boltzmann
2	$e + Ar \longrightarrow 2e + Ar+$	Doğrudan iyonizasyon	15,824	Boltzmann
3	$e + Ar \longleftrightarrow e + Ar*$	Uyarma	11,424	Boltzmann
4	$e + Ar \longleftrightarrow e + Ar$	Uyarma	13,1	Boltzmann
5	$e + Ar* \longrightarrow 2e + Ar+$	Kademeli iyonizasyon	4,3997	Boltzmann
6	Ar* + Ar* ⟶ e + Ar + Ar+	Penning iyonizasyonu	-	6.2×10^{-10} cm^3 s^{-1}
7	$Ar* \longrightarrow hv + Ar$	Radyasyon	-	$1.0\times10^{7}s^{-1}$
8	$Ar* + Ar \longrightarrow Ar + Ar$	Kararlı sönümleme	-	-

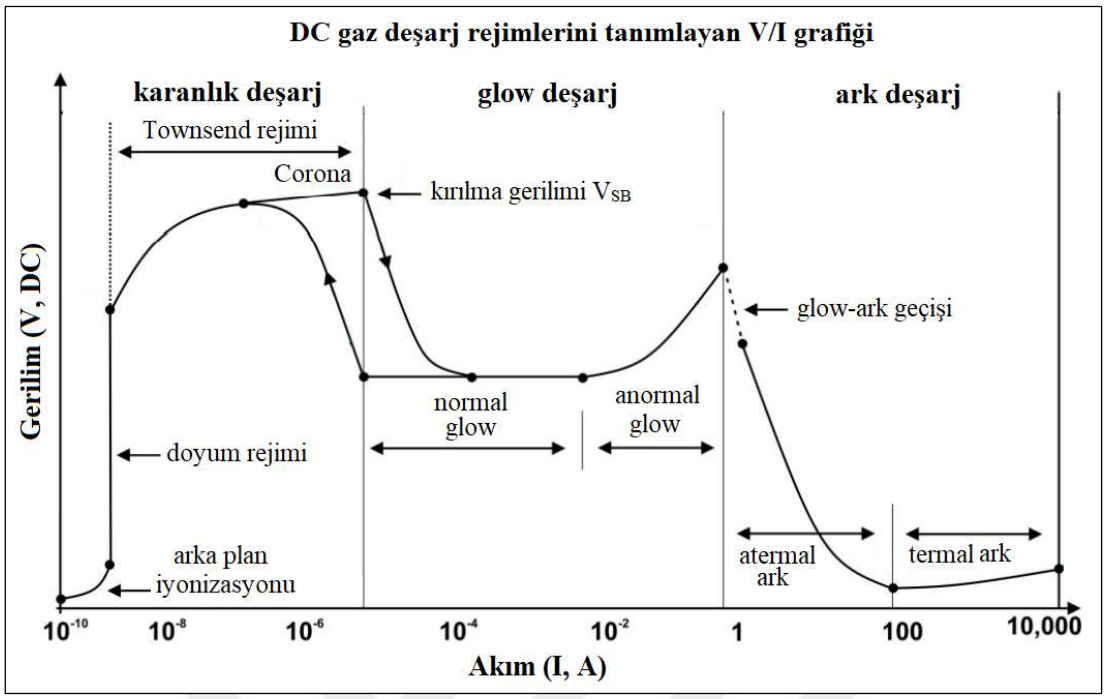
Çizelge 1.2. Argon alan ve sınır reaksiyonları

Alan reaksiyonları	Sınır reaksiyonları
Ar* + Ar* ⟶ e + Ar + Ar+ (k^f= 3,734E8)	Ar+ ⟶ Ar (Katot)
Ar* + Ar ⟶ Ar + Ar (k^f= 1807)	Ar+ ⟶ Ar (Katot harici duvarlar)
	Ar* ⟶ Ar (Tüm duvarlar)

Elektronlar çarpışmalar sırasında çok az kinetik enerji kazanır, böylece argon atomlarının iyonlaşma olasılığı azalır. Bunu telafi etmek için elektrotlar arası besleme gerilimi artırılır.

1.6. DC Gaz Deşarj Rejimleri (V/I grafiği)

Şekil 1.4'te DC besleme altında gaz deşarj rejimleri akım/gerilim (I/V) grafik ortamda tanımlanmıştır.



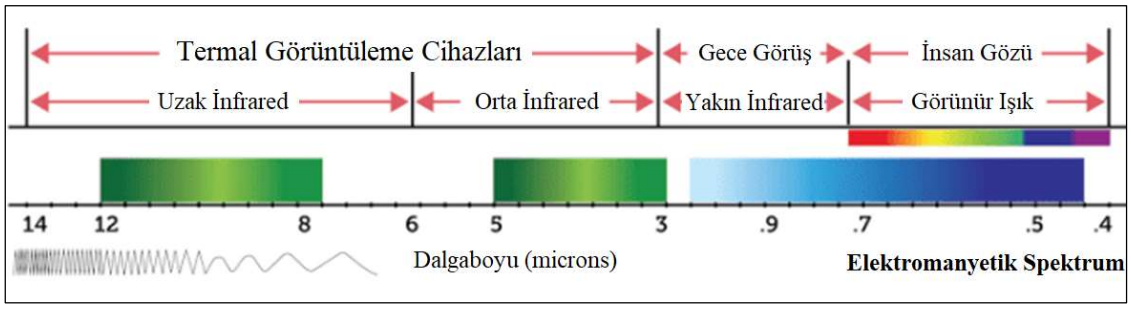
Şekil 1.4. DC gaz deşarj rejimleri (I/V grafiği)

Tez çalışmamız kapsamındaki mikroplazma hücre modelinde, argon (Ar) ile farklı oranlarda hidrojen (H_2) karıştırıldı. Argon/hidrojen ikili gaz karışımında farklı oranlarda hidrojen katkısının kullanılmasının nedeni, gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma hücre modellerinin enerji depolama mekanizmasını ve performansını incelemektir. Simülasyon çalışma ortamında devam etmemizdeki temel nedenlerden bir tanesi, standart laboratuvar koşulları altında deney düzeneğinde hidrojen ile çalışırken ortaya çıkan güvenlik sorunlarına dayanmaktadır. Yüksek yanıcılık düzeyi nedeni ile özel laboratuvar ortamı gibi temel güvenlik önlemleri sağlanmalıdır. Hidrojen, NFPA 704 standardına göre yanıcılık ölçeği en yüksek derece 4'e sahiptir. Havadaki oksijen nedeniyle, hidrojenin havaya hacimsel oranı %4 civarında olduğunda ani tutuşma meydana gelebilir. Simülasyon çalışmalarımız, farklı oranlarda tanımlanmış Ar/H_2 ikili gaz karışım ortamlarda, DC beslemeli normal glow deşarj rejiminde gerçekleşen mikroplazma dinamiklerini daha iyi anlamamızı sağlamıştır.

1.7. Kızılötesi Yarıiletken Malzemeler

Optoelektronik malzeme teknolojisi alanındaki teorik ve deneysel çalışmalara, üretim ve analiz yöntemlerine ve uygulamalara odaklanan ilerlemeler, galyum arsenit (GaAs), galyum fosfit (GaP) ve çinko selenit (ZnSe) dahil olmak üzere çok sayıda optoelektronik malzemenin temel özellikleri tartışılarak kapsamlı bir şekilde rapor edilmiştir [33].

Şekil 1.5'de görünür-kızılötesi spektral bant aralığı dalga boyu ekseninde şematik olarak tanımlanmıştır.



Şekil 1.5. Görünür-kızılötesi dalga boyu spektral bant aralığı

Kızılötesi spektral bantlar; 1-3 μm dalga boyu aralığında kısa dalga kızılötesi (SWIR), 3-5 μm dalga boyu aralığında orta dalga kızılötesi (MWIR) ve 8-14 μm dalga boyu aralığında uzun dalga kızılötesi (LWIR) olarak tanımlanır [34].

Kızılötesi algılama ve görünür dalga boyuna çevirme sistemleri için uygulamaya bağlı olarak uygun yarıiletken malzeme seçimi yapılır. Doğrudan (direkt) ve dolaylı (indirekt) bant aralığına sahip yarıiletken malzemeler kullanılır. Özdirenç değeri minimum 1E7 ohm.cm olmalıdır. Silikon ve diğer indirekt dar bant aralıklı yarıiletkenler kızılötesi foto algılayıcı aygıt olarak çalıştırılmak istendiğinde özel bütünleşik soğutma ekipmanları gerektirir. Kızılötesi foto algılayıcı teknolojisinin sürekli gelişimini desteklemek için çeşitli alternatif malzemeler üzerinde çalışılmaktadır [35, 36]. Yarıiletkenlerin fiziksel ve malzeme özellikleri ayrıntılı olarak rapor edilmiştir [37].

Yüksek elektron hareketliliğine sahip transistörler için InAlSb/InAs/AlGaSb kuantum kuyusu hetero yapıları incelenmiştir [38]. AlGaSb tampon katmanları Sb -tabanlı transistörler için araştırılmıştır [39]. Al açısından zengin AlGaSb'nin kimyasal olarak daha stabil olduğu ve saf AlSb'ye göre oksidasyona karşı daha dirençli olduğu rapor edilmiştir [38, 39].

Dar bant aralıklı dörtlü bileşik yarıiletken indiyum galyum arsenit fosfit (InGaAsP), fotoelektrokimyasal (PEC) su ayırma cihazlarında potansiyel kullanımını göstermek için ilk kez rapor edilmiştir [40].

Argon glow mikro deşarjlarının doğrusal olmayan ve hızlı geçici elektriksel deşarj özellikleri, çinko selenit (ZnSe), galyum arsenit (GaAs), galyum fosfit (GaP) dahil grup II-VI ve III-V ikili alaşım yarıiletken malzemeler için araştırılmıştır.

Deneysel ve simülasyon sayısal analiz çalışmalarımız kapsamında aşağıda belirtilen yarıiletken malzemeler katot elektrot elemanı olarak kullanılmıştır:

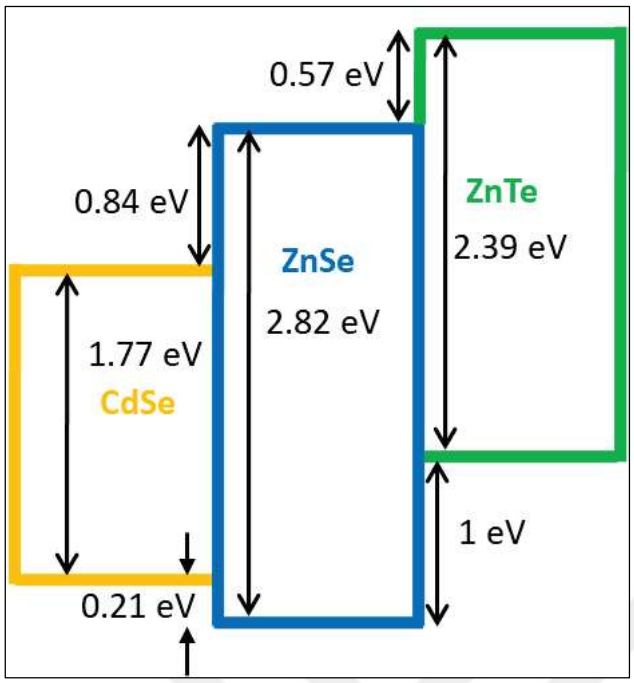
- Çinko selenit (ZnSe)
- Alüminyum galyum antimonid (AlGaSb)
- İndiyum galyum arsenit fosfit (InGaAsP)

1.7.1. Çinko selenit (ZnSe)

Grup II-VI bileşik yarıiletkenler, kızılötesi algılama teknolojileri ve uygulamaları alanında alternatif çözümler sunmaktadır. Soğutmasız kızılötesi foto algılayıcı aygıtlar; yangın erken tespit ve uzaktan uyarı, sürücüler için düşük aydınlatma ortamlarında uzaktan nesne tespiti, elde taşınan gece görüş görüntüleyicileri ve güvenlik gözetimi gibi çeşitli özel uygulamalarda geniş kullanım potansiyeline sahiptir. Ek olarak, grup II-VI bileşik yarıiletken malzemeler, fotovoltaik hücreler (PV), ışık yayan diyotlar (LED) ve kızılötesi katı hal lazer kaynakları dahil olmak üzere çeşitli özel uygulamalar için araştırılmaktadır [41, 42].

300 K'de ~ 2,7 eV doğrudan bant aralığına sahip bileşik yarıiletken çinko selenit (ZnSe) [43], uzun dalga kızılötesi bantta hızlı spektral tepkisi, mükemmel elektronik yük taşıma özellikleri ve görünür spektrumda optik şeffaflık gibi özellikleri nedeniyle termal görüntüleme uygulamaları [44] alanında çalışan araştırmacıların büyük ilgisini çekmiştir. Gaz boşalma-yarıiletken mikroplazma sistemlerde 0,5-15 μm aralığında kızılötesi duyarlılığı açısından ZnSe yarıiletken malzemenin elektriksel, optik ve yapısal özellikleri rapor edilmiş olup, yüksek çözünürlüğü nedeniyle gece görüş cihazları için potansiyel bir malzemedir.

Şekil 1.6'da yüksek içsel soğurma katsayılarına sahip olan Grup II-VI içinde yer alan kadmiyum selenit (CdSe), çinko selenit (ZnSe) ve çinko tellür (ZnTe) bileşik yarıiletkenlerinin değerlik (valans) ve iletim elektronik bant yapısı bir diyagram üzerinde tanıtılmıştır [45].



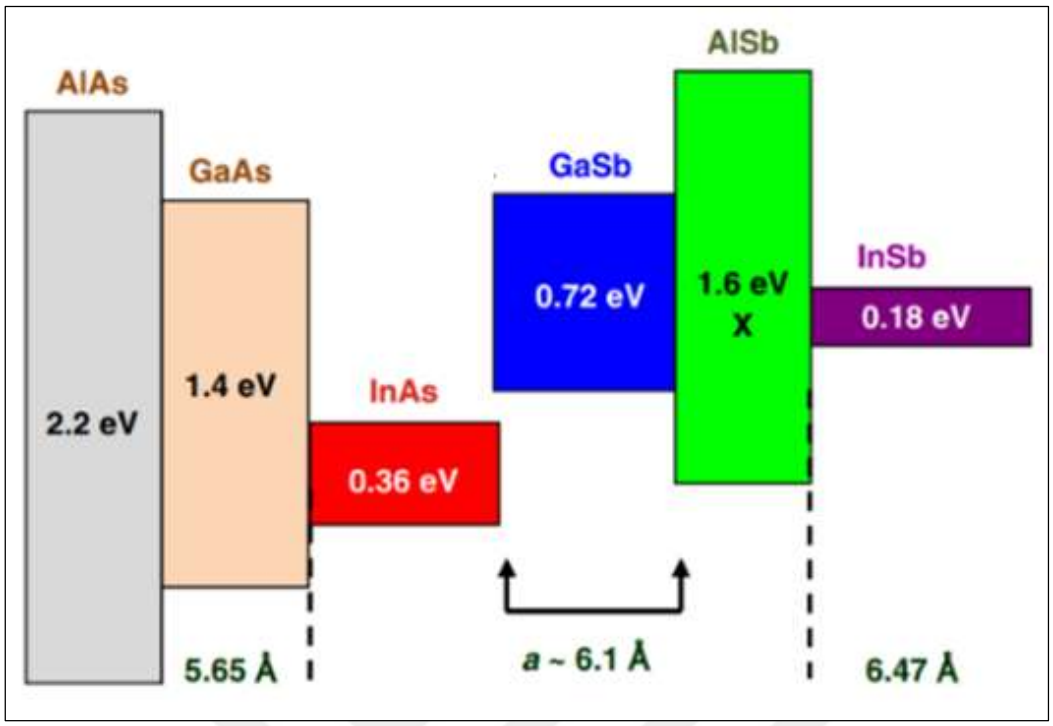
Şekil 1.6. CdSe, ZnSe ve ZnTe elektronik bant yapısı [45]

1.7.2. Alüminyum galyum antimonid (AlGaSb)

Grup III-V bileşik yarıiletkenlerin optoelektronik özellikleri, yüksek çözünürlüklü termal görüntüleme dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için araştırılmıştır. Galyum antimonit (GaSb) veya indiyum arsenit (InAs) alttaşları üzerinde büyütülen antimon (Sb) açısından zengin III-V bileşik yarıiletkenleri, ∼0,1 ila ∼1,8 eV arasında değişen geniş bant aralığına sahip GaSb, InAs ve aluminyum antimonit (AlSb) ikili bileşiklerini içerir [46].

III-Sb bileşik yarıiletkenlerinde erişilebilir bant düzenlerinin çeşitliliği, yakın dalga kızılötesinden (NIR) uzak dalga kızılötesine (FIR) kadar bant aralıklarına sahip uygulamalara özel yapay malzemelerin tasarlanabileceği Şekil 1.7'de verilen valans ve iletim elektronik bant yapısından anlaşılmaktadır [47].

İkili AlSb/GaSb alaşımlarının üçlü III-V bileşiği $Al_xGa_{1-x}Sb$ alaşımlarına bant aralığı geçişleri optoelektronik uygulamalara bağlı olarak, Eg = 1,62 eV'ye sahip indirekt bant aralıklı AlSb yarıiletken ile Eg = 0,72 eV'ye sahip direkt bant aralıklı GaSb yarıiletken arasında kontrol edilebilir [48].



Şekil 1.7. III-As ve III-Sb elektronik bant yapısı [47]

1.7.3. İndiyum galyum arsenit fosfit (InGaAsP)

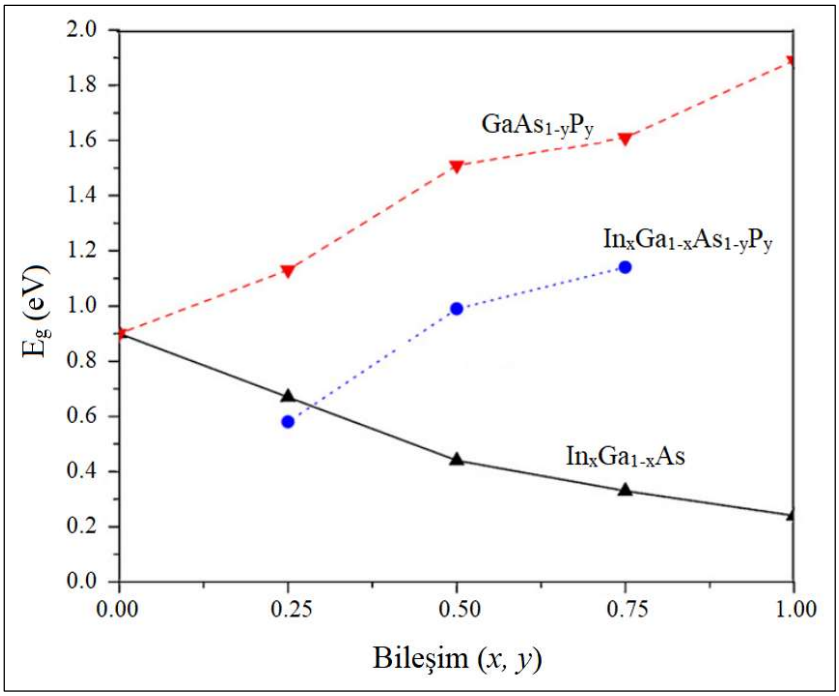
İndiyum galyum arsenit fosfit, alaşım bileşimlerinde x, y mol oranları ile InGaAsP doğrusal formülü ile ya da $In_xGa_{1-x}As_{1-y}P_y$ stokiyometrik formülü ile tanımlanır. Kızılötesi absorpsiyonu, düşük enerjili fotoelektron geçişi, yüzey absorpsiyon katsayısı, yüzey geçirgenliği ve yansıması ve dar bant aralıklı InGaAsP fotokatot malzemesinin kuantum verimliliği üzerindeki yüzey etkileri ayrıntılı olarak incelenmiştir [49].

Araştırmacılar, hafıza etkili enerji depolama aygıtlarının performansını artırmaya yönelik teorik ve deneysel çalışmalar rapor etmektedir. İkili GaAs, InP ve GaP bileşik yarıiletkenler deneysel mikroplazma çalışmalarında kullanılmış olup, gaz boşalma-yarıiletken mikroplazma sisteminde önemli bir etkisi olduğu rapor edilmiştir.

Bu tez çalışması kapsamında, enerji depolama aygıtları başta olmak üzere birçok yeni potansiyel uygulamada kullanılabilecek dörtlü bileşik yarıiletken malzeme InGaAsP davranışı bir GDSμP sisteminde simülasyon analiz yöntemiyle araştırıldı. InGaAsP yarıiletken malzemeler, özellikle yüksek enerji kapasitesine sahip yakın/kısa dalga kızılötesi foto algılayıcılar için ilgi çekici yeni malzemelerden bir tanesidir.

Amacımız, farklı plazma reaksiyonlarını uyarmak için önceden tanımlanmış argon/hidrojen ikili gaz karışımını kullanmak, böylece mikroplazma sisteminin kapasitif güç depolama (CPD) performansını arttırmaktır. Diğer taraftan, elektrik potansiyel dağılımı (EPD) parametresinin mikroplazma reaktör hücresindeki uzay-zamansal dağılımının kararlılığının kısa dalga kızılötesi aygıtlarındaki uygulamaları için kritik önemli olduğu bilinmektedir. Sonuçta, bu sayısal analiz verilerinin InGaAsP tabanlı GDSμP sistem optimizasyonu için gerekli olduğu düşünülmektedir. Fotonik uygulamalarda kullanılan ve uygun kafes eşleşmesi için genellikle InP alttaş üzerinde büyütülen, indiyum arsenit (InAs), galyum arsenit (GaAs), indiyum fosfit (InP) ve galyum fosfitin (GaP) ikili alaşımlarından oluşan dörtlü kristal katı bir yarıiletkendir.

InGaAsP bileşiğini oluşturan ikili alaşımların enerji bant aralıkları 0,33 eV (InAs) - 2,25 eV (GaP) ile 1,29 eV (InP) - 1,43 eV (GaAs) arasındadır. Şekil 1.8'de bileşimlerdeki x, y mol fraksiyonuna bağlı olarak $GaAs_{1-y}P_y$, $In_xGa_{1-x}As$ ve $In_xGa_{1-x}As_{1-y}P_y$'nin bant aralığı enerji değerindeki değişimleri gösteren bir diyagram verilmiştir. $In_xGa_{1-x}As_{1-y}P_y$ dörtlü bileşik yarıiletkenin bant aralığı enerjisinin sırasıyla In ve P mol fraksiyonlarının (x, y) artmasıyla yaklaşık 0,50'den 1,10 eV'ye arttığı anlaşılmıştır [50]. $In_xGa_{1-x}As$ fotokatotunun emisyon katmanının, x = 0,15 değerinde λ_{NIR}=1064 nm dalga boyunda yakın dalga kızılötesi (NIR) tespiti için optimum performansa sahip olduğu rapor edilmiştir.



Şekil 1.8. $GaAs_{1-y}P_y$, $In_xGa_{1-x}As$ ve $In_xGa_{1-x}As_{1-y}P_y$ elektronik bant yapısı [50]

Grup III-V içinde yer alan $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ bileşik yarıiletkenin elektro-optik özellikleri, tepki süresi ve kuantum verimliliği yakın dalga kızılötesindeki ultra hızlı foto emisyon mekanizmaları için teorik temel sağlayan yoğunluk fonksiyonel teorisi ve çok katmanlı optik ince film teorisini esas alarak teorik olarak incelenmiştir [51].

Yakın dalga kızılötesi (NIR) spektral bant aralığında InGaAs yarıiletken malzemenin spektral tepkisini 1064 nm'de gelişmiş bir aktivasyon işlemiyle etkili bir şekilde arttırmanın mümkün olduğu gösterilmiştir [52]. InGaAs emisyon katmanı ile InP alttaş arasındaki arayüzün fotoemisyon performansı üzerindeki etkisi rapor edilmiştir [53].

InGaAs üçlü bileşik yarıiletkenin optik ve mekanik özellikleri, InAs ve GaAs ikili bileşik yarıiletkenlerin oranı değiştirilerek belirlenebilir. $In_{1-x}Ga_xAs$, $In_{0.53}Ga_{0.47}As$ üçlü alaşımını latis uyumu için InP alttaş üzerinde büyütülür. Grup III-V bileşik yarıiletkenlerin heteroeklem kızılötesi fotokatot malzemesi $InP/In_{0.53}Ga_{0.47}As/InP$ alaşımının sayısal analizleri, yakın dalga kızılötesi bantta kuantum verimlilik özelliklerinin arttığını ortaya çıkardı [54]. Ölçümler şunu göstermiştir ki; InP ile latis uyumlu $Ga_{0.47}In_{0.53}As$ üçlü yarıiletken alaşımı, oda sıcaklığında λ=1,68 μm kesme dalga boyuna karşılık gelen 0,75 eV optik absorpsiyon kenarına sahip direkt bant aralığına sahip olup, yakın/kısa dalga kızılötesi bantta 1,0–1,7 μm spektral bant aralığında çalışan foto algılayıcılar için potansiyel kullanım alanına sahiptir [55]. Optik sabitler, Grup III-V ikili alaşımları (GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs ve InSb), üçlü alaşımları ($Al_xGa_{1-x}As$) ve dörtlü alaşımları ($In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$) için [56]'da tanıtılan bir yöntemle 6,0 eV bant aralığı enerji seviyesine kadar hesaplanmıştır.

1.8. Elektrot Yapıları

Eş merkezli çoklu yüzey çıkıntılarının üretilmesi [57], plazmonik metalik nanopartiküllerin (Ag, Au) [58, 59] dekorasyonu gibi mikro ölçekli yapay yüzey desenlemelerinin gaz boşalma ortamının elektriksel kırılımı üzerindeki etkileri, yüzey dalgalılığı ve pürüzlülüğü gibi doğal yüzey morfolojisinin fotokatot yarıiletken malzemenin iş fonksiyonu üzerindeki etkileri [60] ve elektron emisyon mekanizmaları kapsamlı bir şekilde rapor edilmiştir [61].

Gümüş ve titanyum elementlerinden şekillendirilmiş eğik açılı kolonsal ince film morfolojisinin sergilediği optik ve meta malzeme davranışları morötesi (UV) ve görünür (VIS) spektrumda incelenmiştir [62]. Basit düzlemsel silikon tabanlı güneş hücreleri ve

mikro-yapılı silikon güneş hücrelerinin ışık absorpsiyonu ve akım artışları için son araştırmalar ve sayısal hesaplama yöntemleri rapor edilmiştir [63, 64]. Plazma aşındırılmış fotodedektörün yüzey davranışı, düzlemsel bir gaz deşarj-yarıiletken kızılötesi görüntü dönüştürücü hücre modeli üzerinde araştırılmıştır [65]. Tez çalışmamız kapsamında sayısal analiz ve dinamik simülasyon çalışmaları yapılan GDSμP sistem modellerinde, fotokatot elektrot için iki farklı elektron emisyon yüzeyi tanımlandı: (1) basit düzlemsel katot, (2) mikro-desenli düzlemsel katot. Katot elektron emisyon yüzeyinin mikro-desenlenmesi yöntemi ile reaktör hücresine elektron alan emisyon kapasitesinin arttırılması, böylece, yarıiletken-gaz deşarj mikroplazma sisteminin çalışma performansının arttırılması, sistemin düşük sayılı foton emisyonu yapan kızılötesi kaynaklara duyarlılığının ve glow emisyon şiddetinin arttırılması amaçlanmıştır.

Anot elektrot, silika (SiO_2) alttaş üzerinde büyütülmüş kalay oksit (SnO_2) ya da indiyum kalay oksit (ITO) ince film yapıdan oluşturulmaktadır [66, 67]. ITO, n-tipi dejenere bir yarıiletken olup, çok geniş elektronik ve optoelektronik uygulamaları mevcuttur. Sayısal analiz tabanlı modelleme ve simülasyon çalışmalarımız kapsamında; ITO ince film kaplı fotokatot elektrot kullanılmıştır. Mikroplazma reaktör hücresinde görünür spektral bantta üretilen karakteristik glow ışıması anot elektrotunun ITO penceresi boyunca hücre dışına iletilir ve analizi yapılır.

2. ARAŞTIRMA YÖNTEMİ

Tezimiz kapsamında deneysel ve simülasyon araştırma yöntemleri kullanılmıştır.

2.1. Deneysel Araştırma Yöntemi

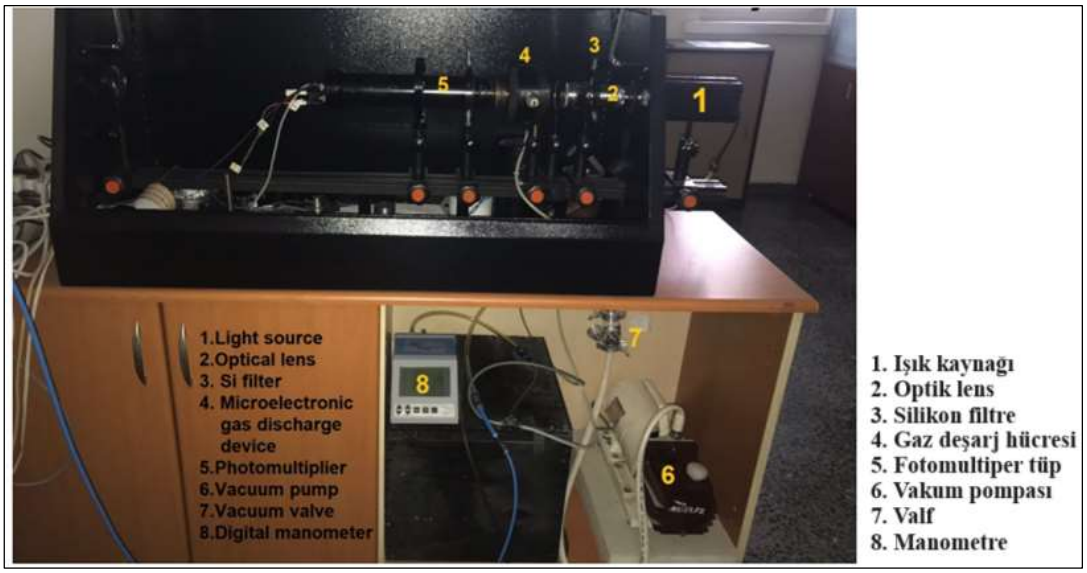
Uyguladığımız deneysel araştırma yönteminde; mikroyapı ve elementel analiz, optik analiz, mikroplazma analizi ve elektriksel analiz teknikleri kullanıldı.

2.1.1. Mikroyapı ve elementel analiz

Çinko selenit (ZnSe) yarıiletken numune malzemenin mikroyapı ve elementel analizinde; enerji dağılımlı X-ışını (EDAX) spektroskopisi ve atomik kuvvet mikroskobu (AFM) teknikleri kullanıldı.

2.1.2. Optik analiz

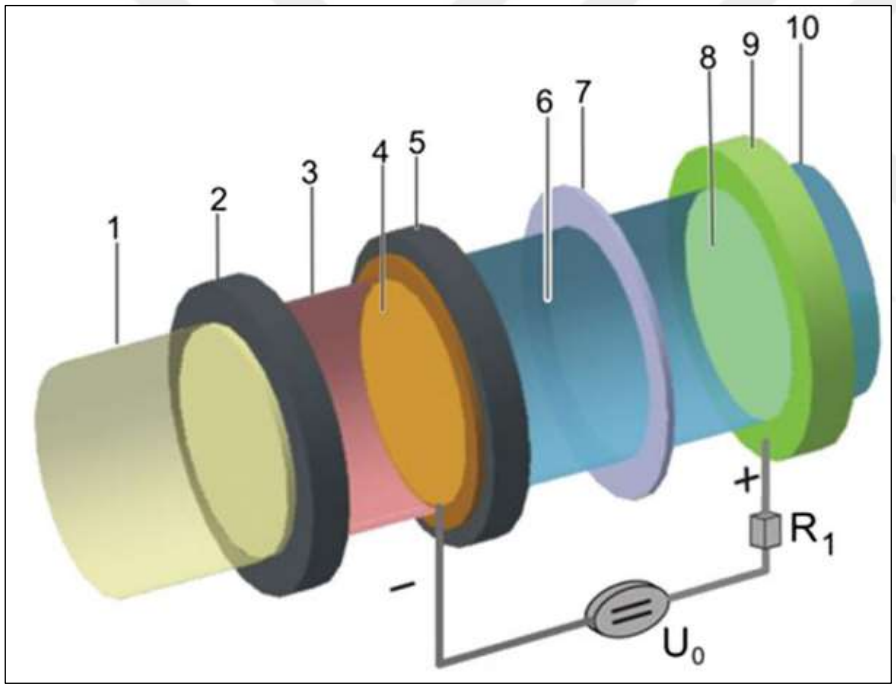
Resim 2.1'de Gazi Üniversitesi Fizik Bölümü Plazma Araştırma Laboratuvarı'nda deneysel çalışmalarda kullanılan kızılötesi görüntü çevirici sisteminin (GDSS) fotoğrafı verilmiştir.



Resim 2.1. GDSS laboratuvar deney düzeneği

2.1.3. Mikroplazma analizi

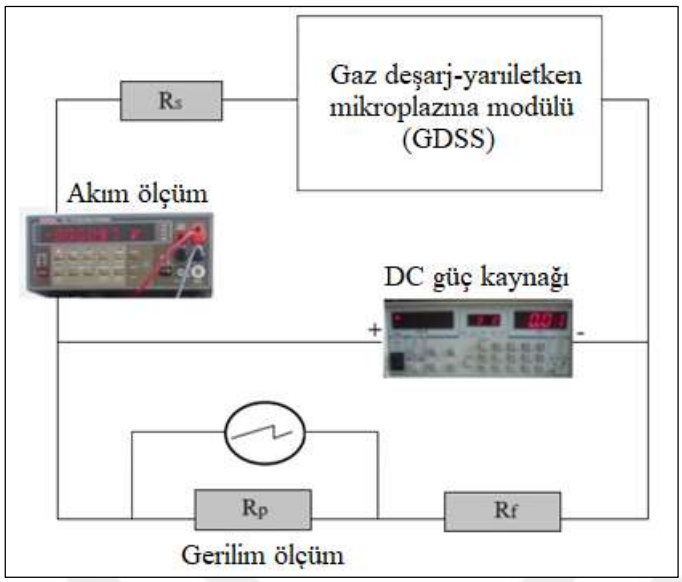
Üç farklı kızılötesi aydınlatma şiddet seviyesinde (karanlık, zayıf, güçlü) uyarılan fotokatot-mikroplazma ortamında üretilen glow deşarj ışık emisyonları, foto çoğaltıcı tüp kullanılarak ölçülmüştür. Gazi Üniversitesi Mikroplazma Araştırma Laboratuvarı'nda mevcut IR-VIS dalga boyu dönüştürücü deneysel çalışmalarını gerçekleştirmek için foto çoğaltıcı tüple donatılmış gaz boşalma-yarıiletken mikroplazma sistemine ait hücre modülünün şematik gösterimi Şekil 2.1 ‘de verilmiştir. ZnSe fotokatotun kızılötesi ışık altında aydınlatılan yüzeyine 40 nm kalınlığında altın (Au) ince film IR-geçirgen elektriksel kontak, anot tarafında 80 nm kalınlığında indiyum kalay oksit (ITO) ince film VIS-geçirgen elektriksel kontakt olarak kullanılıştır [15].



Şekil 2.1. GDSS deneysel hücre modülü şematik görsel: (1) ışık kaynağı, (2) Silikon filtre, (3) IR ışık girişi, (4) IR geçirgen Au-film kontakt, (5) ZnSe fotokatot disk, (6) Gaz deşarj mikro aralığı, (7) Mika dielektrik ayraç, (8) VIS ışık çıkışı, (9) VIS geçirgen ITO-film kontakt, (10) Silika disk

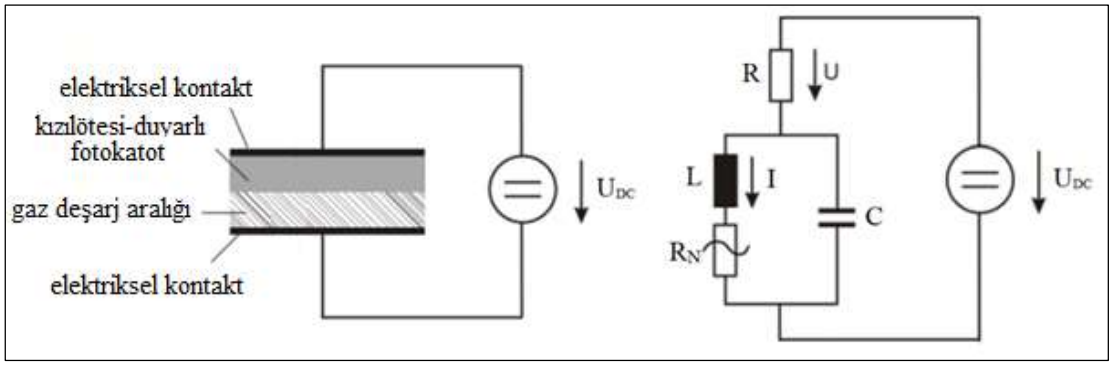
2.1.4. Elektriksel analiz

Elektrik test düzeneği Şekil 2.2 ‘de şematik olarak tanıtılmıştır. Ölçümlerde multimetre Keithley 199 ve DC güç kaynağı Stanford PS cihazlar kullanıldı.



Şekil 2.2. GDSS elektriksel ölçüm devre düzeneği

Şekil 2.3'te "gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma sisteminin" elektriksel eşdeğer devre modeli verilmiştir. Yarıiletken fotokatot elektrot ile gaz deşarj aralığının doğrudan kuplajı ile oluşan ve doğrusal-olmayan akım (I) ve gerilim (V) karakteristik özellikli mikroplazma hücre yapısı modellenmektedir.



Şekil 2.3. GDSS elektriksel eşdeğer devre modeli (R_s=1.0 kΩ, C_p=1.0 pF)

2.2. Simülasyon Araştırma Yöntemi

Modellenen hücre yapısı küçük çok sayıda sonlu elemanlara (mesh) bölünür. Bu yöntem, her bir mesh yapıyı modelde tanımlanan sınır ve alan şartları altında ilgili matematiksel denklemleri kullanarak analiz eder. Simülasyon çalışmaları, sonlu elemanlar yöntemi (FEM) çözücü COMSOL Multifizik DC plazma programı kullanılarak iki boyutlu düzlemsel gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma (GDSμP) sistemlerine ait farklı hücre modelleri üzerinde

gerçekleştirildi. Simülasyon sayısal analizler, karışım ortalamalı difüzyon sürüklenme teorisine ve Maxwell elektron enerji dağılım fonksiyonuna dayanmaktadır. Hesaplamalı simülasyonlar, gaz deşarj parametrelerinin uzay-zamansal dağılımını görselleştirmek için sınırlarla ayrılmış ağ yapısına dayalı olarak gerçekleştirildi.

2.2.1. Teorik çerçeve

Sayısal analizlerin teorik çerçevesi aşağıdaki fiziksel temellere dayanmaktadır:

- Karışım ortalamalı difüzyon sürüklenme teorisi
- Maxwell elektron enerji dağılım fonksiyonu
- Townsend elektron çığ reaksiyonları
- Düşük-basınç normal glow gaz deşarj prosesi

Deneysel olarak gözlemleyemediğimiz gaz boşalma-yarıiletken mikroplazma sistemlerinin sınır problemlerini sayısal olarak çözerek, elektron alan emisyon durumundan kendi kendini besleyen normal glow deşarj durumuna kadar elektriksel hızlı geçiş glow deşarj davranışlarını araştırmak için simülasyon çalışmaları yapıldı.

2.2.2. Gaz boşalma parametreleri

Simülasyon çalışmaları kapsamında analiz edilen mikroplazma deşarj parametreleri:

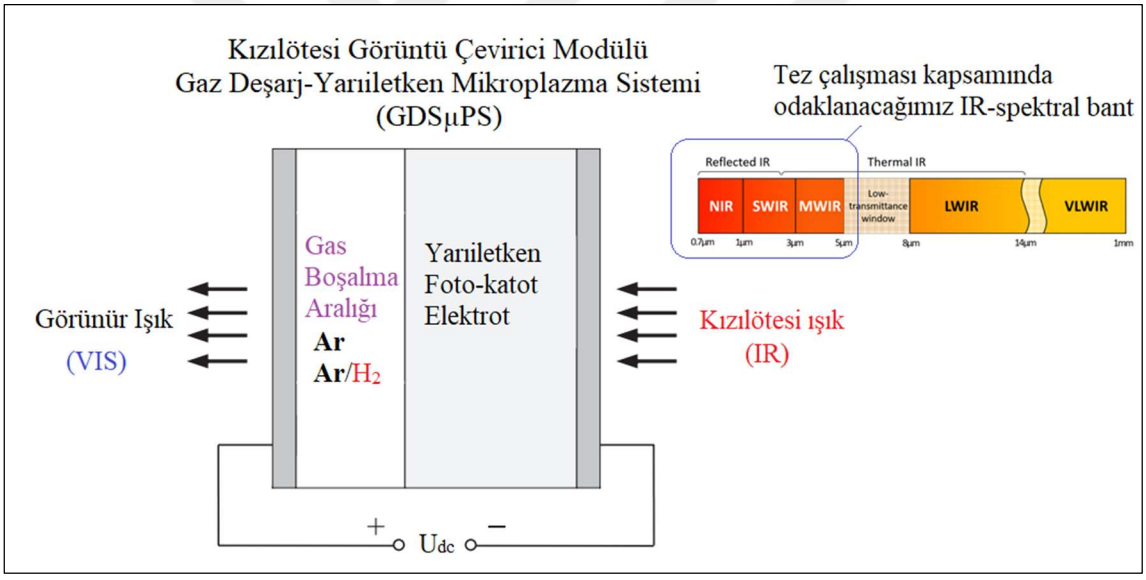
- Elektron yoğunluğu (ED)
- Elektron akım yoğunluğu (ECD)
- Elektrik potansiyel dağılımı (EPD)
- Kapasitif güç depolama (CPD)

Mikroplazma dağılım modelleri, gaz boşalma aralığı, gaz basıncı ve plazma ortamında yer alan reaksiyon tipleri ile değişir. Bu nedenle makroskobik ölçekte ortalama dağılım değerleri dikkate alınır.

Yarıiletken-gaz boşalma mikroplazma sistemi, elektrotlar arası 50 μm ve 100 μm gaz boşalma aralığına (d) sahip düzlemsel anot/katot elektrot çifti ile birleştirilmiş dikdörtgen

geometrili bir reaktör hücresinde modellenmiştir. Modelde, kızılötesi dalga boyuna duyarlı yarıiletken katot malzemenin reaktör hücresindeki elektron emisyonu yüzeyi 1 µm x 1 µm boyutlarında kare yapılar ile mikro-desenlenerek elektron emisyon yüzeyi arttırılmıştır. Önerilen modelin elektriksel eşdeğer devresi (EEC), sabit bir gerilim kaynağı tarafından beslenmiştir. Tekli argon (Ar) veya ikili argon/hidrojen (Ar/H_2) gaz ortamı, reaktör hücresine atmosfer altı basınç seviyelerinde tanımlanmıştır.

Tez çalışmamız kapsamında modellenen IR-VIS görüntü çeviricinin hücre modülünün şematik gösterimi Şekil 2.4'te verilmiştir. Doğru-akım (DC) beslemeli iki boyutlu düzlemsel reaktör hücresinde paralel düzlemsel anot/katot elektrot çiftinden oluşan modelde atmosfer altı basınçlarda normal glow gaz boşalma bölgesinde çalışan mikroplazma ortamı oluşturulmuştur.

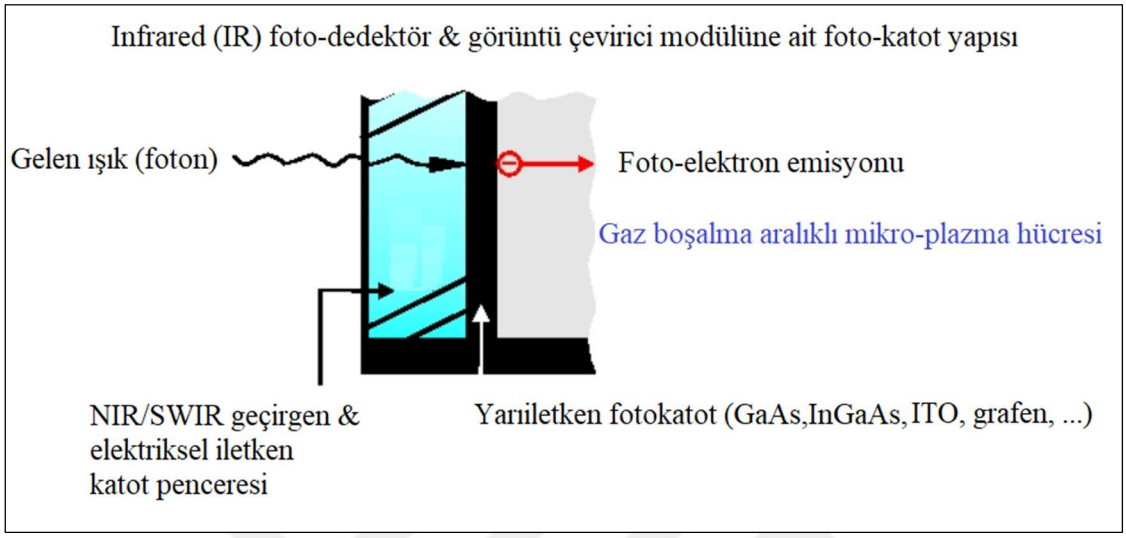


Şekil 2.4. Gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma (GDSµP) modülü

İki boyutlu kare geometrili reaktör hücresine sahip GDSµP modelinde; elektron emisyon yüzeyi mikro-desenlenmiş fotokatot, mikro deşarj üzerinden basit düzlemsel anot elektrota kuple edildi.

Mikroplazma hücresi, tekli argon ve ikili argon/hidrojen gaz ortamında atmosfer altı basınç seviyesinde normal glow deşarj rejiminde çalışacak şekilde tasarlandı. Gaz karışımları farklı mol fraksiyonlara göre belirlendi. Sistemin elektriksel eşdeğer devresi DC gerilim kaynağı tarafından beslendi.

Şekil 2.5'te IR-algılayıcı ve VIS-görüntü çevirici sisteminde modellenen yarıiletken–gaz boşalma aralıklı mikroplazma hücre yapısında kullanılan fotokatot elektrotun şematik gösterimi verilmiştir.

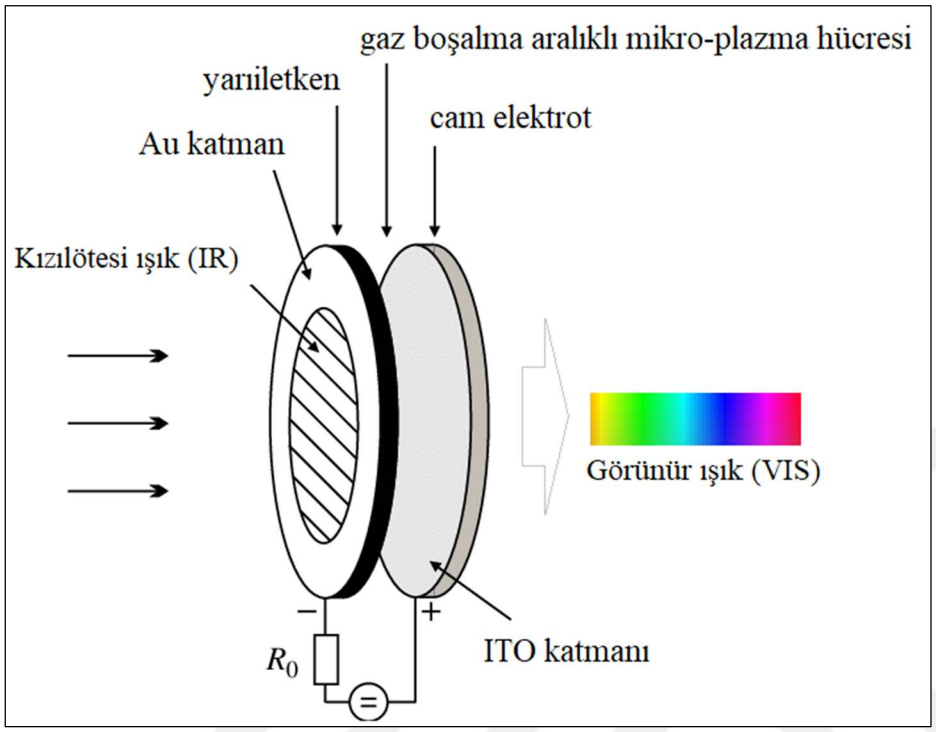


Şekil 2.5. Fotokatot çalışma prensibi

Isıl ya da yansımalı IR ışık kaynağından gelen fotonlar, yarıiletken fotokatot yüzeyinde soğurulur ve anot/katot arasındaki DC beslemeli elektrik alan etkisi altında mikroplazma hücresine serbest elektron emisyonu sağlanır. Serbest elektronlar, gaz ortamda (Ar, Ar/H_2) anoda doğru hızlandırılır. Yüksek kinetik enerjiye sahip serbest elektronlar, nötr gaz moleküleriyle çarpışarak hücredeki iyonlaşma reaksiyonlarını başlatır. Townsend çığ (TA) mekanizması gaz ortamın yalıtım (kesim) durumundan iletken (deşarj) duruma geçmesine yol açar. Kızılötesi ışıma altında fotoelektron emisyonu yapan katottan beslenen gaz ortamda DC elektrik alan etkisi ile normal glow boşalma rejiminde kendi kendisini besleyen mikroplazma oluşur. Optik olarak ışığı geçiren ve elektriksel olarak iletken olan düzlemsel anot elektrot boyunca çıkan glow ışıması fotoelektron çoklayıcı tüp yardımı ile şiddeti arttırılır ve elektronik olarak algılanabilir ve işlenebilir seviyeye getirilir.

Şekil 2.6'da gaz boşalma-yarıiletken mikroplazma (GDSμP) sisteminin kızılötesi foto algılayıcı ve görünür ışık dalga boyu çevirici modülüne ait bir şematik verilmiştir. Gelen kızılötesi radyasyon, yüksek özgül dirençli (ρ>E5 ohm.cm) yarıiletken fotokatot malzemesi tarafından verimli bir şekilde emilir. DC alan beslemeli paralel katot/anot elektrot kuple argon gaz reaktör hücresinde normal glow boşalma rejiminde oluşan mikroplazma

radyasyonu anot penceresinden foto çoklayıcı tüpe iletilir ve bağlı elektronik düzenek tarafından görüntü işlenerek analiz edilir.



Şekil 2.6. Kızılötesi-görünür dalga boyu çevirici modülü

GDSµP sistemi, esas olarak, kızılötesi dalga boyunu görünür ışık dalga boyuna dönüştürmek için tasarlanmış bir yarıiletken-gaz deşarj mikroplazma modülüdür.

Sonlu elemanlar yöntemi (FEM) çözücü COMSOL Multifizik DC plazma simülasyon programını kullanarak, elektron yoğunluğu (ED), elektron akım yoğunluğu (ECD) ve elektrik potansiyel dağılım (EPD) parametrelerini sayısal olarak çözmek suretiyle hızlı geçiş glow boşalma özelliklerini göstermek için karşılaştırmalı iki farklı GDSµP modeli aynı anda çalıştırıldı.

2.2.3. Simülasyon model parametreleri

GDSµP sisteminin simülasyon modellerinde kullanılan fotokatot özellikleri, reaktör hücresinin yapısal özellikleri ve reaktör hücresinin gaz özellikleri sırasıyla Çizelge 2.1, Çizelge 2.2 ve Çizelge 2.3'te tanımlanmıştır.

Çizelge 2.1. GDSμP reaktör hücresinin fotokatot özellikleri

Fotokatot Özellikleri	
Yarıiletken malzeme tipi:	Elektron alan emisyon yüzeyi:
Çinko selenit (ZnSe)	Basit düzlemsel Mikro-desenli (modifiye) düzlemsel
Alüminyum galyum antimonid (AlGaSb)	Mikro-desenli (modifiye) düzlemsel
Indiyum galyum arsenit fosfit (InGaAsP)	Basit düzlemsel

Çizelge 2.2. GDSμP reaktör hücresinin yapısal özellikleri

Reaktör Yapısal Özellikleri	
Gaz boşalma aralığı (d):	Reaktör hücre geometrisi:
50 μm 100 μm	2-boyutlu kare düzlemsel reaktör
100 μm	2-boyutlu eliptik düzlemsel reaktör

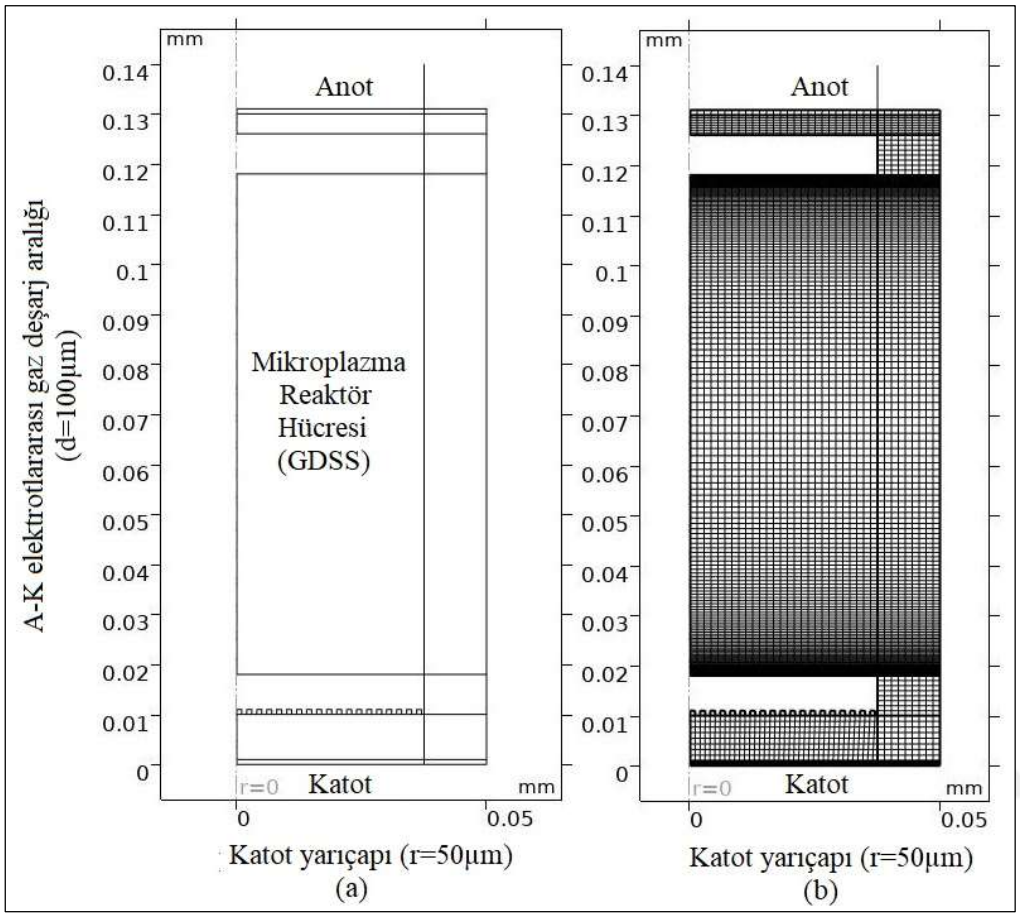
Çizelge 2.3. GDSμP reaktör hücresinin gaz özellikleri

Proses Gaz Özellikleri		
Gaz tipi:	Gaz basıncı:	Hidrojen oranı:
Ar: Argon	150 Torr 200 Torr 250 Torr	0%
Ar/H_2: Argon/hidrojen karışımı		5% 10% 30% 40%

2.2.4. Simülasyon modellerinin fiziksel özellikleri

İki boyutlu diktörtgen ve eliptik geometriye sahip düzlemsel yapıdaki doğru akım (DC) beslemeli gaz boşalma-yarıiletken mikroplazma (GDSμP) sisteminin mikro ölçekli modellerinde FEM çözücü COMSOL Multifizik DC plazma simülasyon programı kullanarak; elektron yoğunluğu (ED), elektron akım yoğunluğu (ECD), elektrik potansiyel dağılımı (EPD) ve kapasitif güç depolama (CPD) temel deşarj parametreleri sayısal olarak analiz edildi.

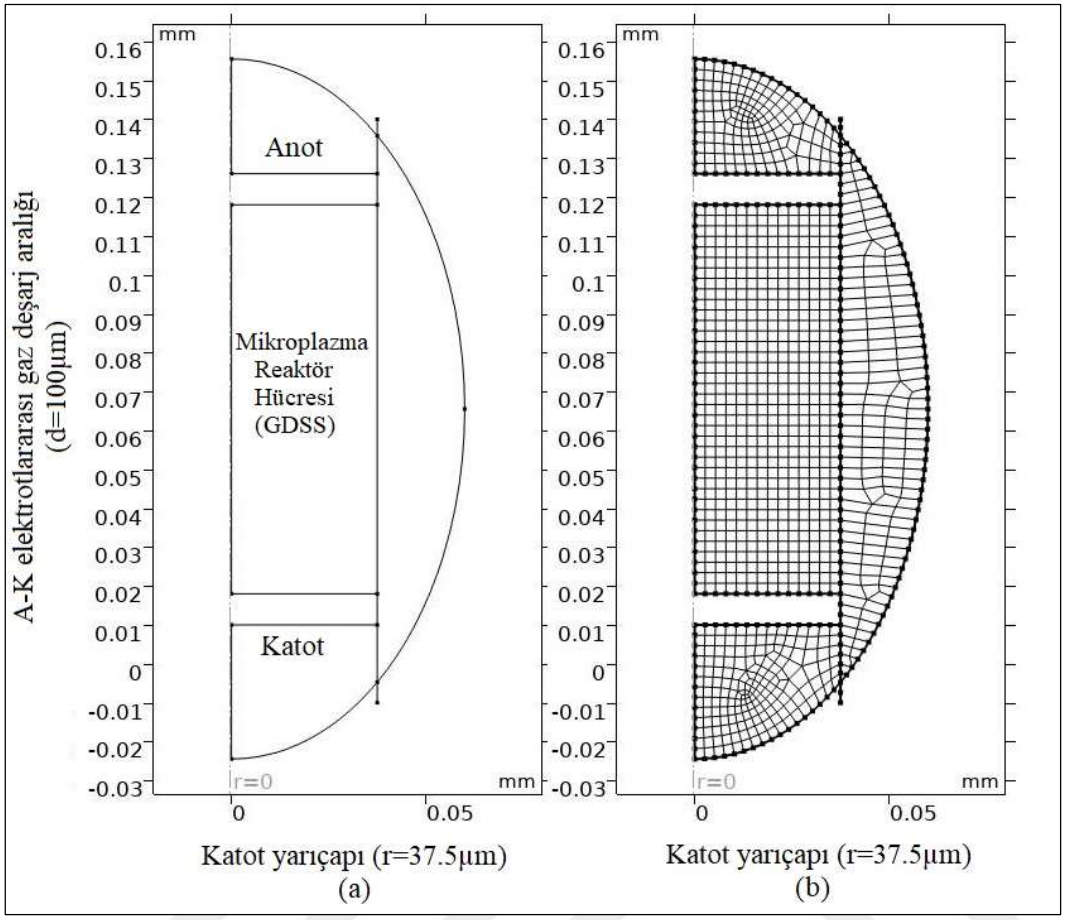
GDSμP sisteminde çalışılan iki farklı simülasyon hücre modeline ait fiziksel ve mesh (ağ) yapısı Şekil 2.7 ve Şekil 2.8'de tanımlanmıştır.



Şekil 2.7. Dikdörtgen geometrili GDSμP hücrenin fiziksel ve simülasyon ağ yapısı

Şekil 2.7 (a)'da r=0 simetri ekseni referans alınarak çizilen iki-boyutlu düzlemsel dikdörtgen geometriye sahip hücrenin katot yarıçap (r=50 μm) ve elektrotlar arası gaz boşalma aralığı (d=100 μm) değerleri belirtilmiştir. Katot elektron emisyon yüzeyi 1 μm x 1 μm boyutlarda sıralı kare geometrili yapıda modellenmiştir. Anot elektrot basit düzlemsel yapıda modellenmiştir. Şekil 2.7 (b)'de modelin mesh (ağ) yapısı verilmiştir.

Şekil 2.8(a)'da r=0 simetri ekseni referans alınarak çizilen iki-boyutlu düzlemsel eliptik geometriye sahip hücrenin katot yarıçap (r=37.5 μm) ve elektrotlar arası gaz boşalma aralığı (d=100 μm) değerleri belirtilmiştir. Katot elektron emisyon yüzeyi ve anot elektrot basit düzlemsel yapıda modellenmiştir. Şekil 2.8(b)'de modelin mesh yapısı görülmektedir.



Şekil 2.8. Eliptik geometrili GDSµP hücrenin fiziksel ve simülasyon ağ yapısı

Şekil 2.8 (a)'da r=0 simetri ekseni referans alınarak çizilen iki-boyutlu düzlemsel eliptik geometriye sahip hücrenin katot yarıçap (r=37,5 µm) ve elektrotlar arası gaz boşalma aralığı (d=100 µm) değerleri belirtilmiştir.

Mikroplazma reaksiyon sekansının uzay-zamansal elektriksel boşalma davranışı bir boyutlu, iki boyutlu ve üç boyutlu grafik ortamda kapsamlı bir şekilde analiz edilmiştir.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

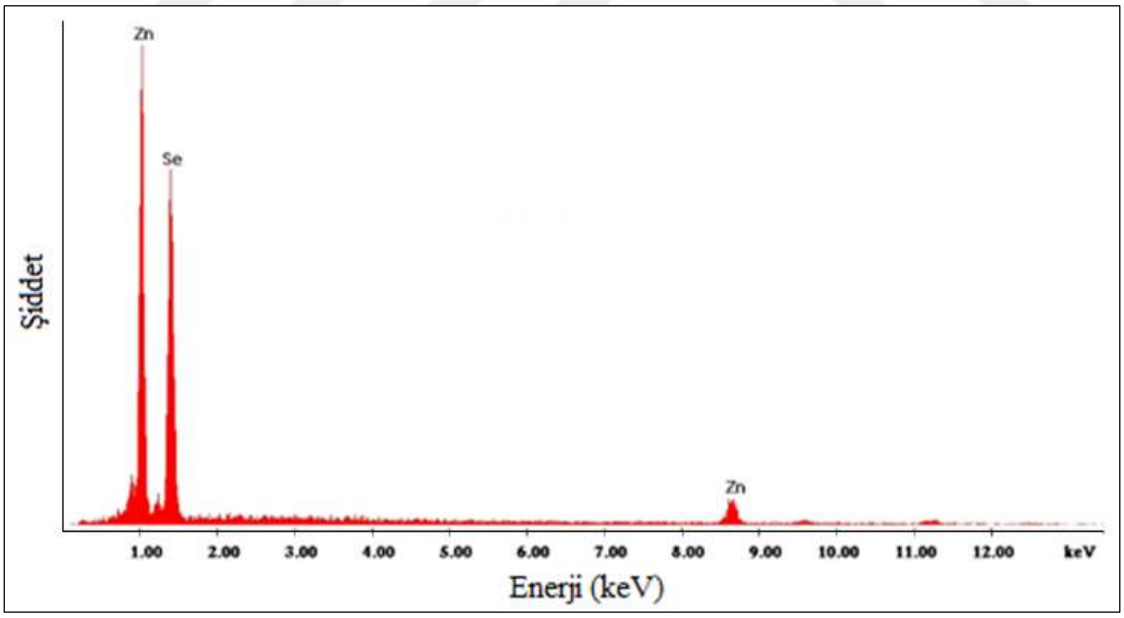
3.1. Deneysel Araştırma Bulguları

3.1.1. Çinko selenit (ZnSe)-argon (Ar) mikroplazma sistemi

ZnSe-Ar yarıiletken-gaz boşalma sistemindeki elektriksel boşalma parametreleri, farklı ışıma şiddetindeki kızılötesi aydınlatma altında atmosfer altı basınçlarda sayısal ve deneysel olarak araştırıldı. Mikroyapı ve elementel analiz sonuçları ve plazma etkileşimlerinden elde edilen deneysel veriler rapor edildi. Temin edilen ZnSe numune malzemenin elementel ve yüzey mikroyapı analizleri yapıldı.

Elementel ve mikroyapı analizi

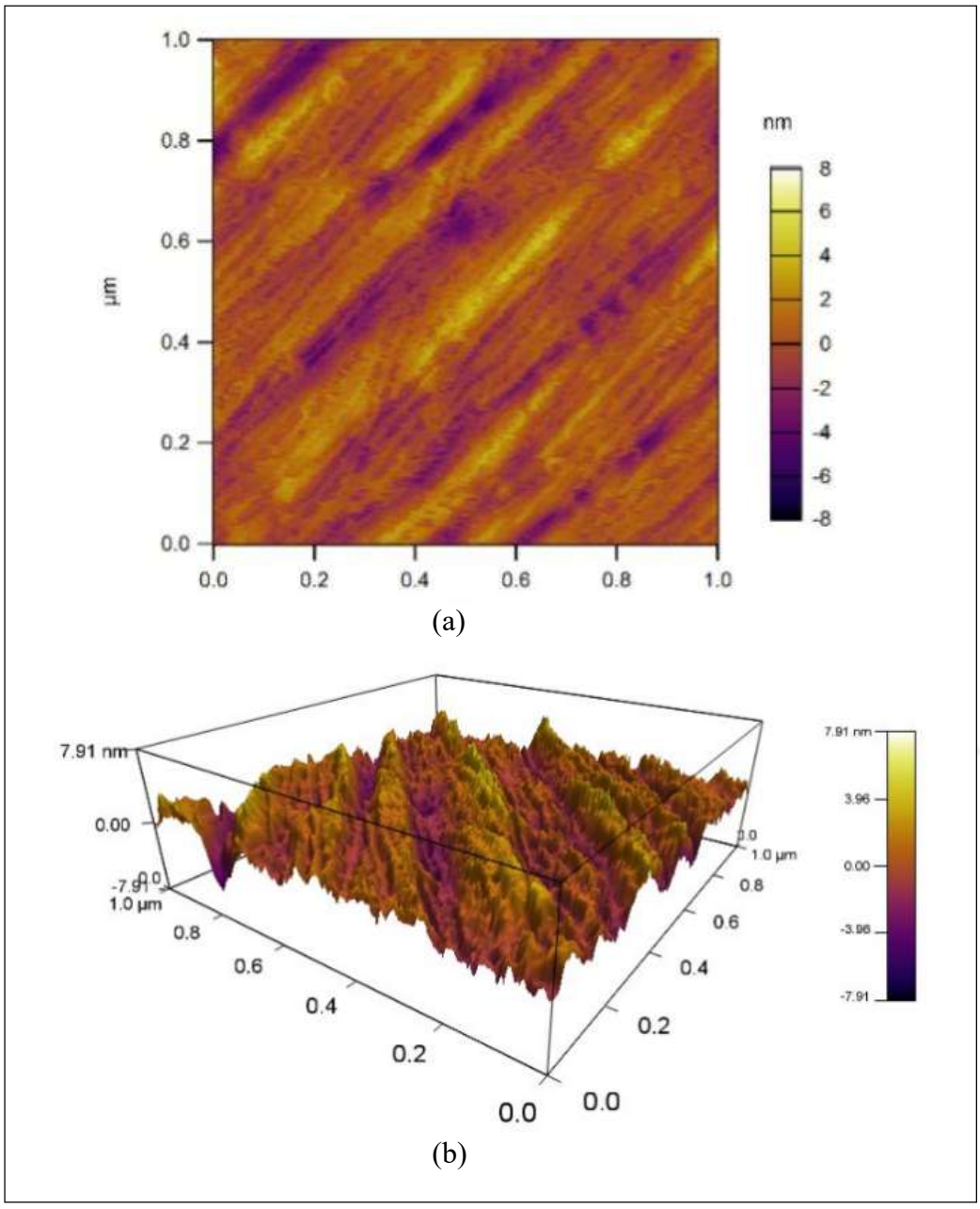
Şekil 3.1'de ZnSe numunenin enerji dağılımlı X-ışını spektroskopi (EDAX) analiz sonucu verilmiştir.



Şekil 3.1. ZnSe yarıiletken numuneye ait EDAX grafiği

ZnSe ikili bileşiğinin stokiyometrik oranları hakkında veri elde edildi. Numune malzemenin ağırlıkça % 65,04 selenyum (Se) ve % 34,96 çinko (Zn) elementlerinden oluştuğu tespit edildi.

Resim 3.1'de ZnSe numune malzemenin 1 μm × 1 μm tarama alanında yüzeyden alınmış iki ve üç boyutlu atomik kuvvet mikroskobu (AFM) görüntüleri verilmiştir.



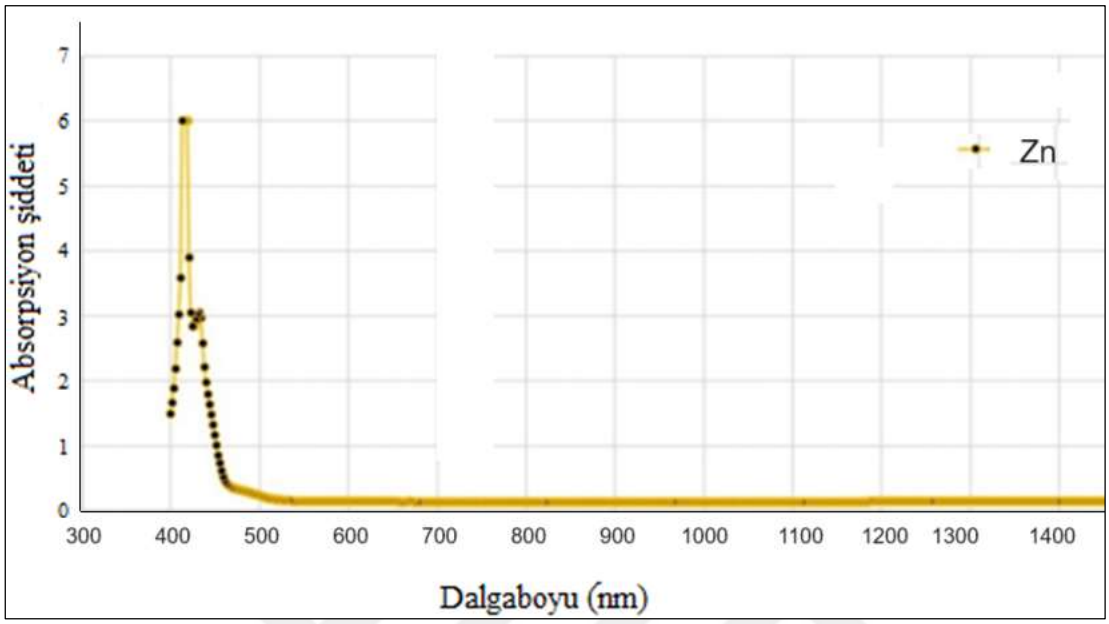
Resim 3.1. ZnSe numuneye ait AFM görüntüleri: (a) iki boyutlu yüzey (b) üç boyutlu kesit

ZnSe numuneye ait yüzey topografik görüntüleri yaklaşık ±8.0 nm aralığında yüzey pürüzlülüğü göstermektedir.

Optik analiz

ZnSe yarıiletken numuneye ait spektrofotometrik absorpsiyon ölçümü yapıldı.

800-1500 nm dalga boyu aralığındaki absorpsiyon-dalga boyu değişim grafiği Şekil 3.2'de verilmiştir.



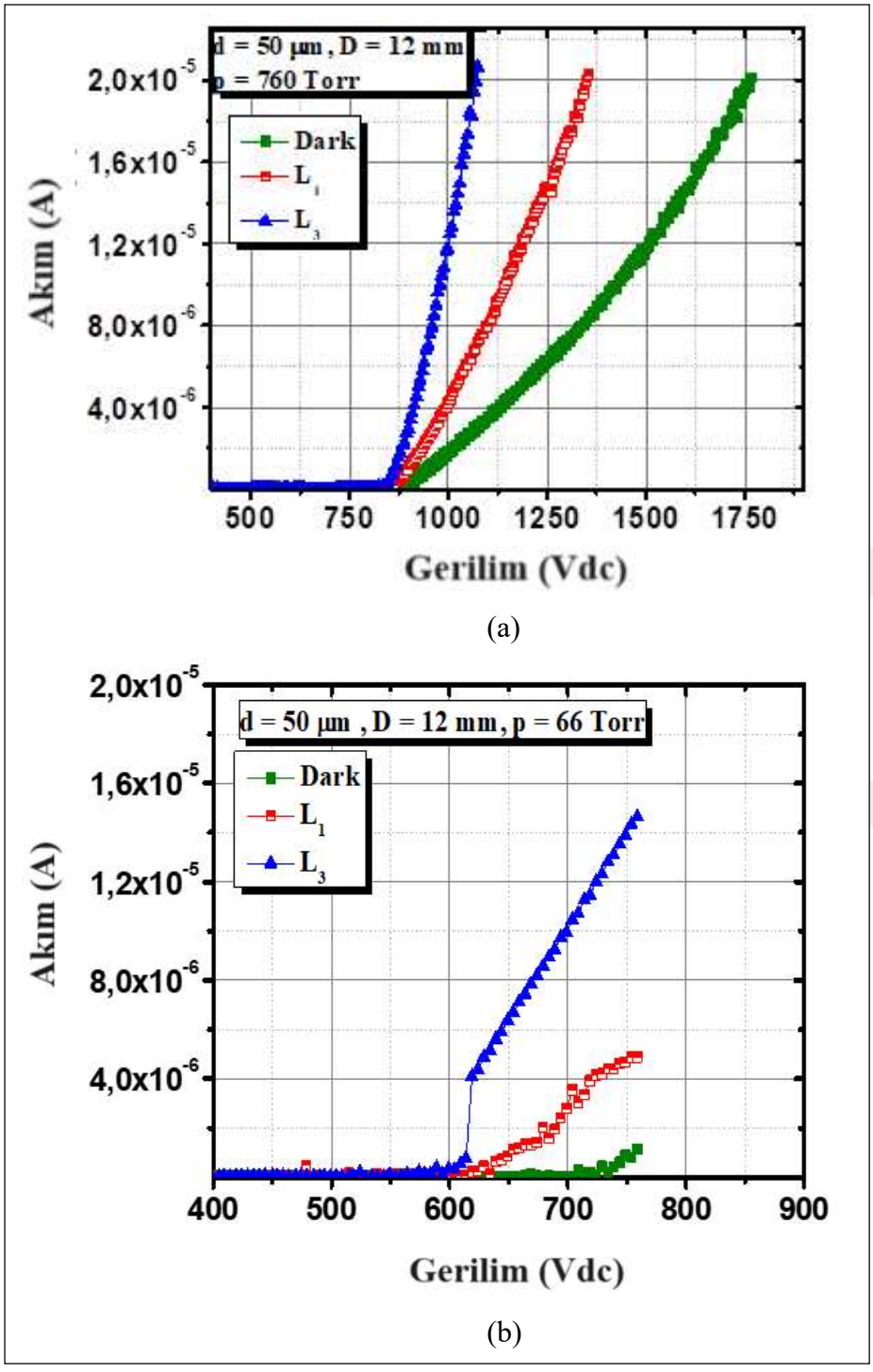
Şekil 3.2. ZnSe yarıiletken numuneye ait kızılötesi absorpsiyon grafiği

Modellediğimiz kızılötesi foto algılayıcı-görünür dalga boyu çevirici modülünün 800-1500 nm yakın dalga kızılötesi (NIR) spektral bant aralığında yüksek geçirgenliğe sahip ZnSe yarıiletken katot malzeme ile çalıştırılabileceği görüldü.

Elektriksel analiz

Kızılötesi aydınlatma şiddetinin, hücrenin akım-gerilim karakteristikleri (CVC) üzerindeki etkisi atmosfer basınç seviyesindeki argon gaz ortamında analiz edildi. Şekil 3.3 (a)'da 12 mm katot çaplı ZnSe ve 760 Torr basınç seviyesindeki argon reaktör hücresinden oluşan 50 µm boşalma aralığına sahip mikroplazma hücresinin CVC değişim grafiği verilmiştir.

Kızılötesi aydınlatma şiddetinin, hücrenin akım-gerilim karakteristikleri (CVC) üzerindeki etkisi atmosfer altı basınç seviyesindeki argon gaz ortamında analiz edildi. Şekil 3.3 (b)'de 12 mm katot çaplı ZnSe ve 66 Torr basınç seviyesindeki argon reaktör hücresinden oluşan 50 µm boşalma aralığına sahip mikroplazma hücresinin CVC değişim grafiği verilmiştir.



Şekil 3.3. ZnSe-Ar modülünün yakın/kısa dalga kızılötesi radyasyon şiddetine bağlı akım-gerilim grafiği: (a) 760 Torr Ar (b) 66 Torr Ar

Hücredeki plazma akımı, elektrotlar arası DC besleme geriliminin ve kızılötesi aydınlatma şiddetinin fonksiyonu olarak anlık artış göstermektedir. Mikroplazma hücresinin elektriksel kırılım gerilimi (V_{BD}), 760 Torr argon basınç seviyesinde güçlü aydınlatma şiddetinde (L3) 850 VDC, orta aydınlatma şiddetinde (L1) 875 VDC, zayıf aydınlatma şiddetinde (dark) 900 VDC civarında ölçüldü. Mikroplazma hücresinin elektriksel kırılım gerilimi (V_{BD}), 66 Torr

argon basınç seviyesinde güçlü aydınlatma şiddetinde (L3) 600 VDC, orta aydınlatma şiddetinde (L1) 625 VDC, zayıf aydınlatma şiddetinde (dark) 700 VDC civarında ölçüldü.

Deneysel verilerden anlaşıldığı üzere; ZnSe fotokatot yarıiletken malzemenin artan kızılötesi radyasyon şiddeti altında aydınlatılması neticesinde DC alan beslemeli mikroplazma reaktör hücresi içine elektron emisyon miktarı da artmakta ve sonuçta statik elektriksel kırılım gerilimi (V_{BD}) düşmektedir.

Fotokatot yüzeyine gelen kızılötesi radyasyonun dalga boyu ve şiddeti, mikroplazma reaktör modülünün elektriksel olarak tetiklenmesinde ve mikroplazma reaksiyon sekans sürecinin başlangıç ve gelişiminde kritik rol almaktadır.

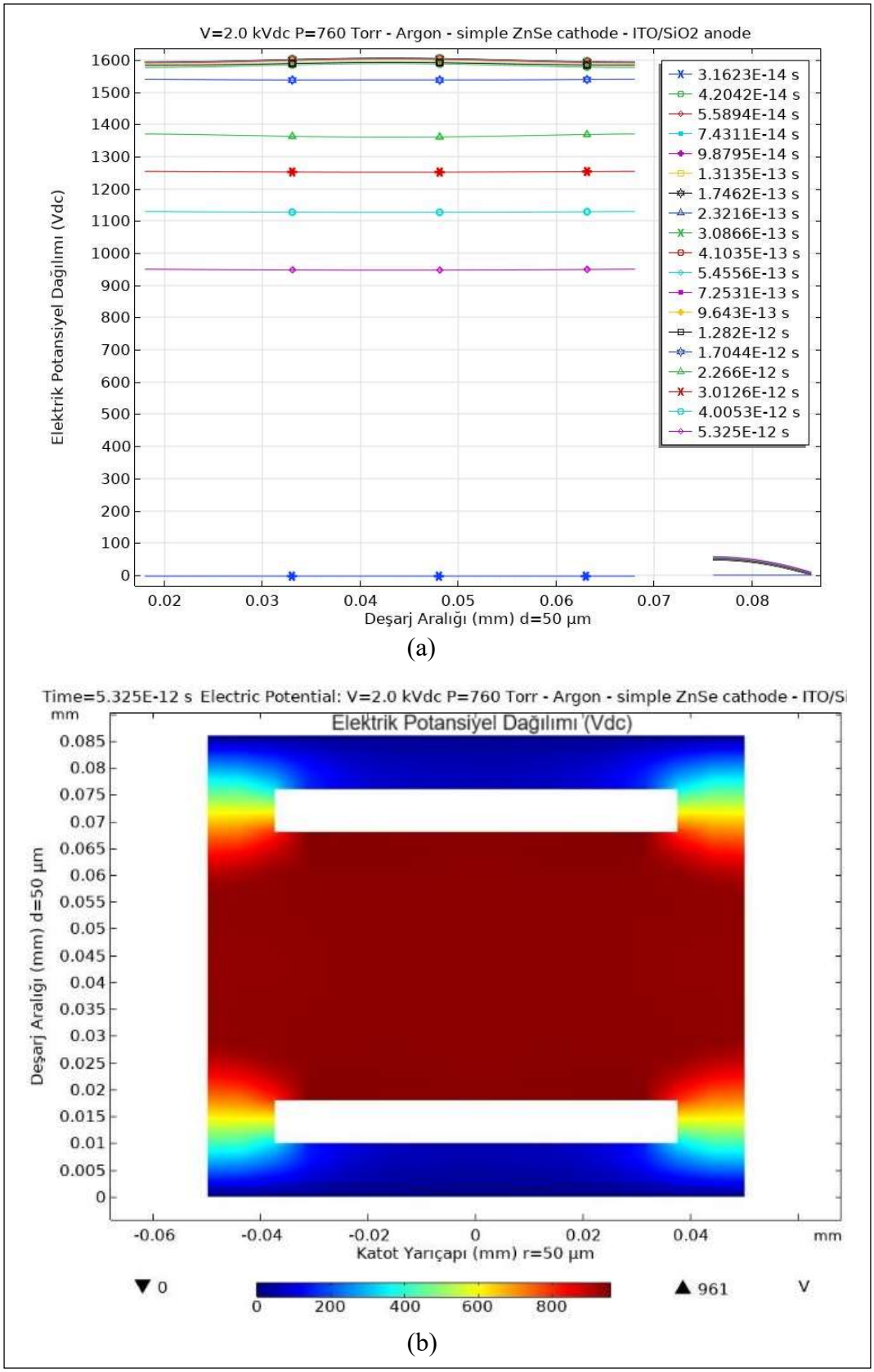
Gazlarda elektriksel kırılım, elektrik yüklü parçacıkların üretimi ile bunların mikroplazma hücresi boyunca rekombinasyon ve difüzyon süreçlerindeki kayıpları arasındaki karşılıklı denge tarafından yönetilen en önemli olaylardan biridir.

Elektron sayısının artmasına neden olan çarpışma iyonizasyon etkisinin, mikro ölçekli deşarj boşluklarında alan emisyonunda önemli rol oynadığı anlaşıldı.

Bundan dolayı, yarıiletken fotokatot malzemenin tipi, elektron emisyon yüzeyinin mikroyapısı ve diğer elektro-optik özellikleri, mikroplazma reaktör hücresinin kızılötesi çalışma dalga boyu aralığının ve sistemin elektriksel çalışma noktasının belirlenmesinde kritik öneme sahiptir.

Şekil 3.4 (a)'da ZnSe-Ar (760 Torr) simülasyon modülünün elektrik potansiyel dağılımının (EPD) zamanla değişimi ($3.1623E\text{-}14 \leq t \leq 5.325E\text{-}12$) verilmiştir.

Şekil 3.4 (b)'de mikroplazma reaksiyon sekans sonunda (t_s = 5.325E-12s) gaz boşalma hücresi içinde oluşan iki boyutlu elektrik potansiyel dağılımının (EPD) uzaysal değişimi verilmiştir.



Şekil 3.4. ZnSe-Ar (760 Torr) simülasyon EPD grafiği: (a) sekans (b) son

Şekil 3.3 (a)'daki deneysel ve Şekil 3.4 (a)'daki sayısal simülasyon verileri kıyaslandığında; zayıf kızılötesi aydınlatma şiddetinde (dark) oluşan statik elektriksel kırılım geriliminin (V_{BD}) yaklaşık aynı değerde oluştuğu görülmüştür, sırasıyla V_{BD}=950 VDC ve V_{BD}=961 VDC. Simülasyon modeli ve deneysel model EPD parametresi ile doğrulamıştır.

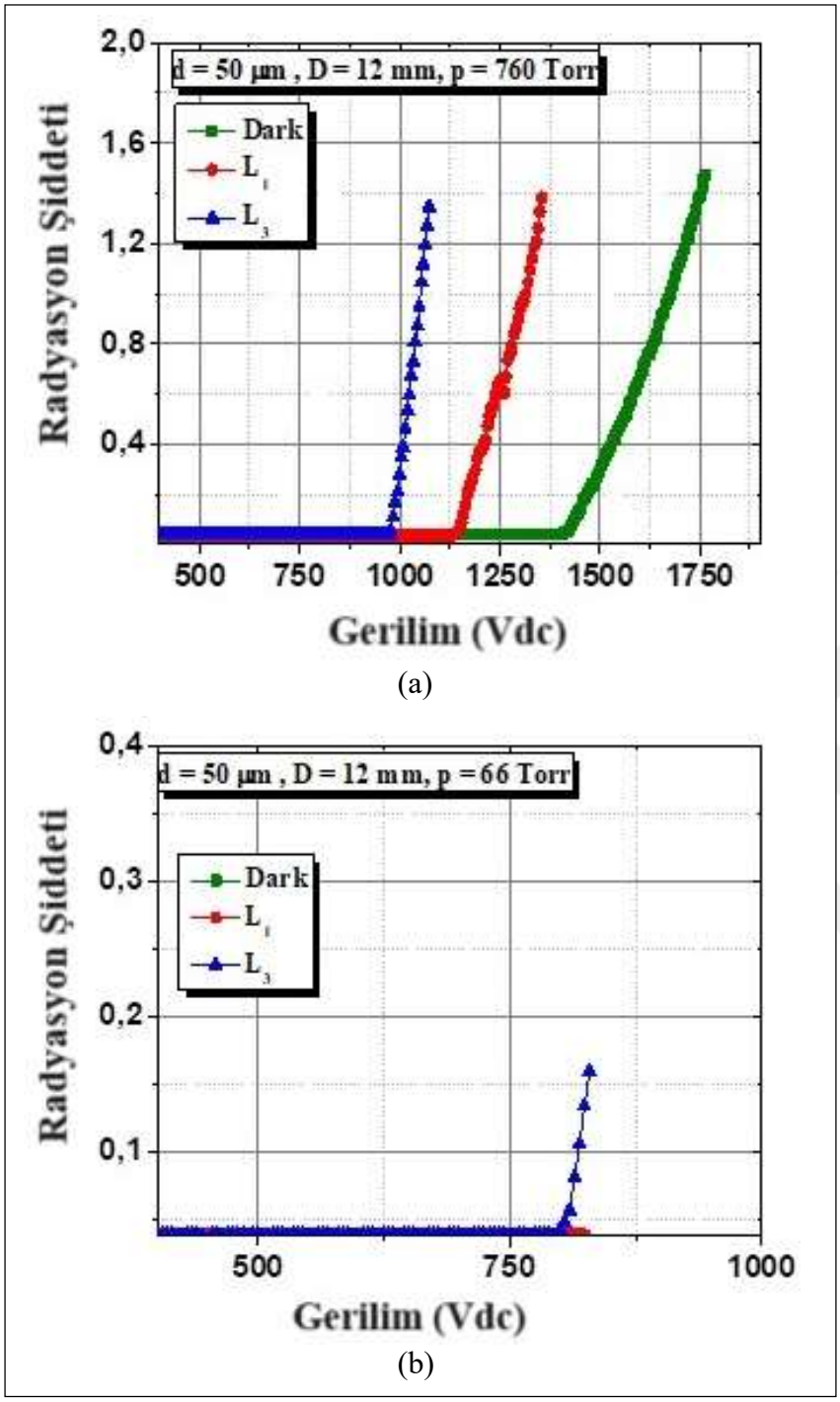
Plazma analizi

Kızılötesi spektral bantta farklı radyasyon şiddeti altında (zayıf, orta, güçlü) aydınlatılan ZnSe yarıiletken fotokatot elektrotun kuple olduğu argon mikroplazma hücresinin glow deşarj ışık emisyon ölçümleri yapıldı.

Mikroplazma reaktör hücresi için, argon gazı 66 Torr ve 760 Torr basınç seviyelerinde tutuldu. Öncelikle, hücrenin içi mekanik vakum pompası yardımıyla 10 mTorr basınç seviyesine kadar boşaltıldı. Argon gazı kontrollü olarak hücre içine verildi. Glow boşalma ışık emisyon ölçümleri, anot elektrot üzerinde kalay oksit (SnO_2) ince film kaplı silika pencereden çıkan görünür dalga fotonların bir foto çoğaltıcı tüp üzerinden geçirilmesi suretiyle yapıldı.

Böylece, farklı kızılötesi radyasyon şiddetlerine maruz kalan ZnSe yarıiletken fotokatot elektrota kuple mikroplazma reaktör hücresinin farklı argon gaz basınç seviyesindeki elektriksel gaz boşalma dinamikleri analiz edildi. Argon gaz basıncının mikroplazma glow ışıması üzerindeki etkileri grafik ortamda analiz edildi.

Elektriksel kırılım gerilimi (V_{BD}) noktasına ulaşılıncaya kadar gaz ortam yalıtkan iken, ZnSe katot üzerindeki kızılötesi aydınlatma şiddetinin arttırılmasıyla gaz ortam elektriksel olarak yalıtkan durumundan iletken duruma geçmiştir, Şekil 3.5.



Şekil 3.5. ZnSe-Ar modülünün kızılötesi radyasyon şiddeti-gerilim grafiği: (a) 760 Torr Ar (b) 66 Torr Ar

760 Torr atmosfer basınç seviyesinde güçlü (L3) aydınlatma şiddeti altında 1,4 birim radyasyon şiddeti ölçüldü. 66 Torr atmosfer altı basınç seviyesinde güçlü (L3) aydınlatma şiddeti altında 0,17 birim radyasyon şiddeti ölçüldü.

3.2. Simülasyon Araştırma Bulguları

3.2.1. Simülasyon analiz çalışması (SİM-1)

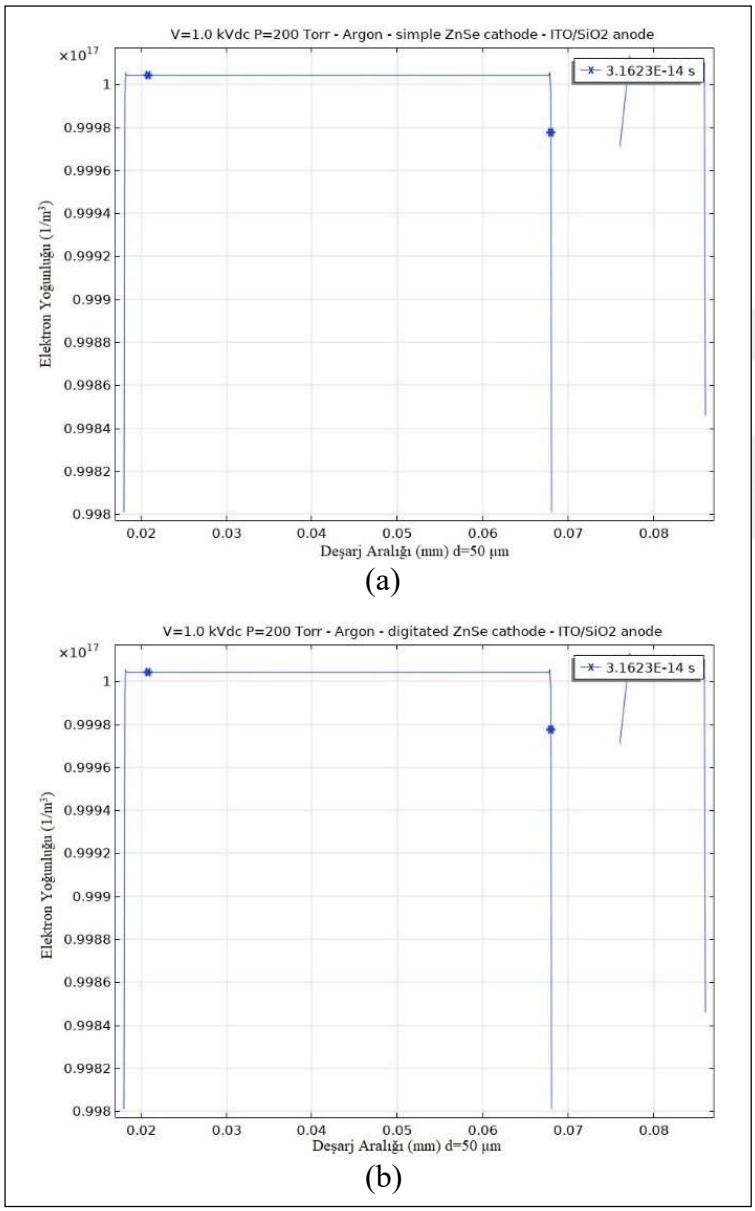
İki boyutlu düzlemsel kare geometriye sahip doğru akım (DC) beslemeli gaz boşalma-yarıiletken (ZnSe) mikroplazma sisteminin (GDSμPS) mikro ölçekli modeli FEM çözücü COMSOL Multifizik DC plazma simülasyon programını kullanarak elektron yoğunluğu (ED), elektron akım yoğunluğu (ECD), elektrik potansiyel dağılımı (EPD) ve kapasitif güç depolama (CPD) plazma parametreleri için analiz edildi. Mikroplazma reaksiyon sürecinin uzay-zamansal dinamik davranışı grafik ortamda kapsamlı bir şekilde incelendi. Çizelge 3.1'de SİM-1 simülasyon çalışmasına ait parametre tanımları verilmiştir.

Çizelge 3.1. SİM-1 simülasyon çalışmasına ait parametre tanımları

Parametre	Tanım	
Simülasyon Çalışması Kodu	SİM-1	
GDSμPS (gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma sistemi)	ZnSe-Ar	ZnSe-Ar
Simülasyon Modelleri	Temel model	Modifiye model
Hücre yapısı	İki-boyutlu kare geometrili düzlemsel reaktör	
Hücre besleme gerilimi	V = 1,0 kVDC	
Plazma proses gaz tipi ve karışım oranı	Argon (Ar)	
Plazma proses gaz basıncı	P = 200 Torr	
Elektrotlar arası mesafe (anot-katot)	d = 50 μm	
Fotokatot elektrot malzemesi	Çinko selenit (ZnSe) yarıiletken (Adachi ve Taguchi, 1991)	
Fotokatot elektrot elektriksel kontak malzemesi	Altın (Au) ince-film (Johnson ve Christy 1972: n, k 0.188-1.937 μm)	
Fotokatot elektron emisyon yüzeyi	Basit düzlemsel	Mikro-desenli düzlemsel 1,0 μm 1,0 μm 1,0 μm periyodik kare morfoloji
Fotokatot elektrot çapı	r = 50 μm	
Anot elektrot malzemesi	Silika (SiO_2) (Malitson 1965: Fused silica; n 0,21-6,7 μm)	
Anot elektrot elektriksel kontak malzemesi	İndiyum kalay oksit (ITO) ince-film (Moerland ve Hoogenboom 2016: n,k 0,4-1,0 μm)	
Gaz ortamdaki başlangıç (tohum) elektron yoğunluğu	$n_{e,o} = 1{,}0x10^{17}$ $(1/m^3)$	
Paschen çarpımı	P.d = 200 Torr.50 μm = 1,0 Torr.cm	
Hücre çalışma ortam sıcaklığı	T = 300 K	

Elektron yoğunluğu (ED)

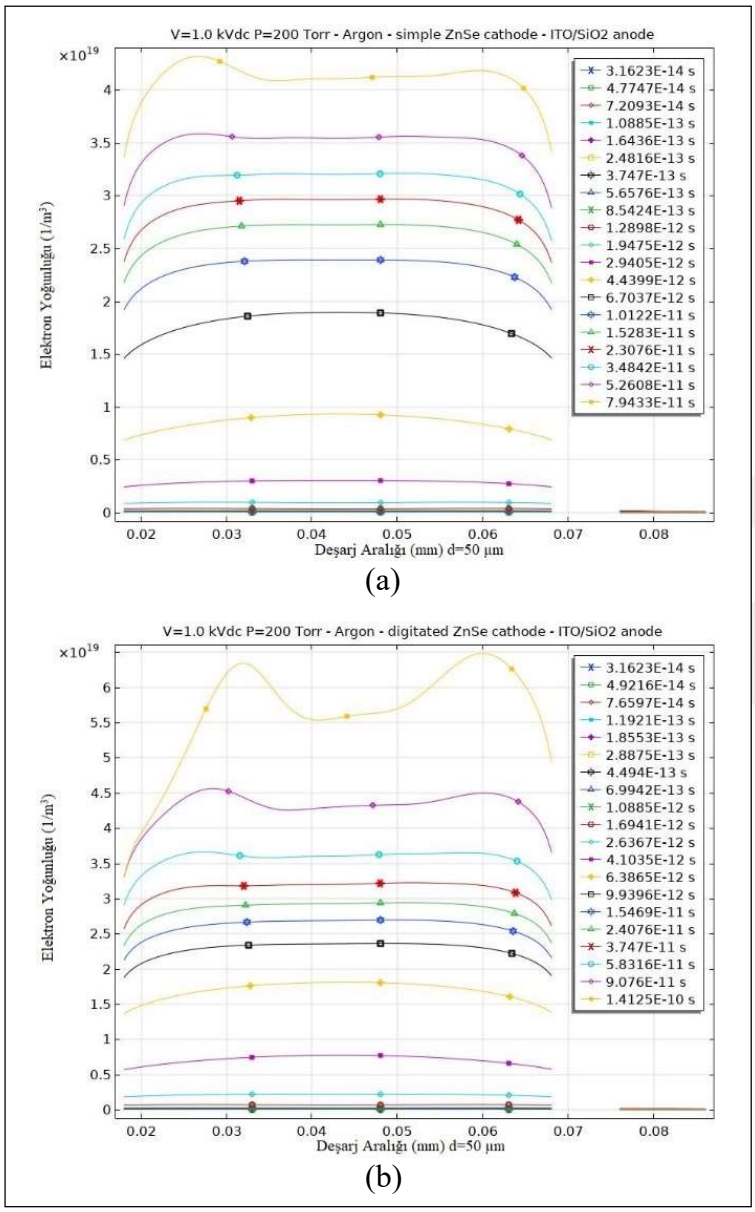
Şekil 3.6'da SİM-1 1D-ED $_{sekans\text{-}başlangıç}$ Ar-mikroplazma sistemine ait basit ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot modelleri için ED grafikleri verilmiştir. Reaktör gaz ortamdaki başlangıç elektron yoğunluk değeri hesaplamalarda 1,0x10^{17} (1/m^3) alınmıştır.



Şekil 3.6. SİM-1 1D-ED$_{sekans\text{-}başlangıç}$ Ar (a) basit, (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot

Başlangıçta (t_0=3,1623x10^{-14} s) arka plan iyonizasyon reaksiyonları devam etmesine rağmen, Townsend (TA) iyonizasyon reaksiyon süreci henüz başlamadığından ve gaz ortamın elektriksel kırılımı (V_{BD}) gerçekleşmediğinden dolayı ED parametresi, reaktör odacığında kararsız ve ortalama bir dağılım göstermektedir.

Şekil 3.7'de SİM-1 1D-ED$_{sekans}$ Ar-mikroplazma sistemine ait basit ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot modelleri için ED grafikleri verilmiştir.

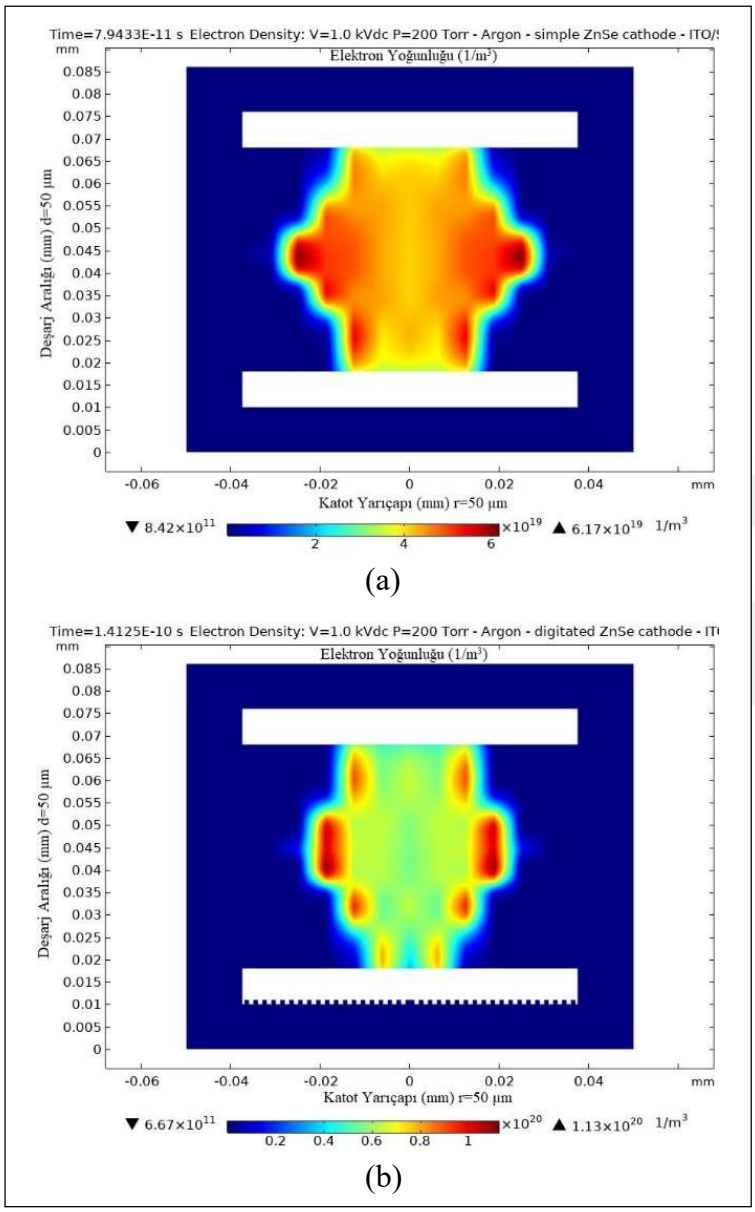


Şekil 3.7. SİM-1 1D-ED$_{sekans}$ Ar (a) basit, (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot

Karşılaştırmalı modellerin mikroplazma reaksiyon sekansları, simülasyon zaman cetvelinde sırasıyla, basit düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde 7,9433x10^{-11} s ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde 1,4125x10^{-10} s zaman diliminde tamamlanmıştır.

ED parametresi, aynı tipteki gaz sistemlerinin (Ar) farklı elektron emisyon yüzey morfolojisine sahip katot modellerinde (basit, mikro-desenli) karakteristik uzay-zamansal davranış sergilemiştir.

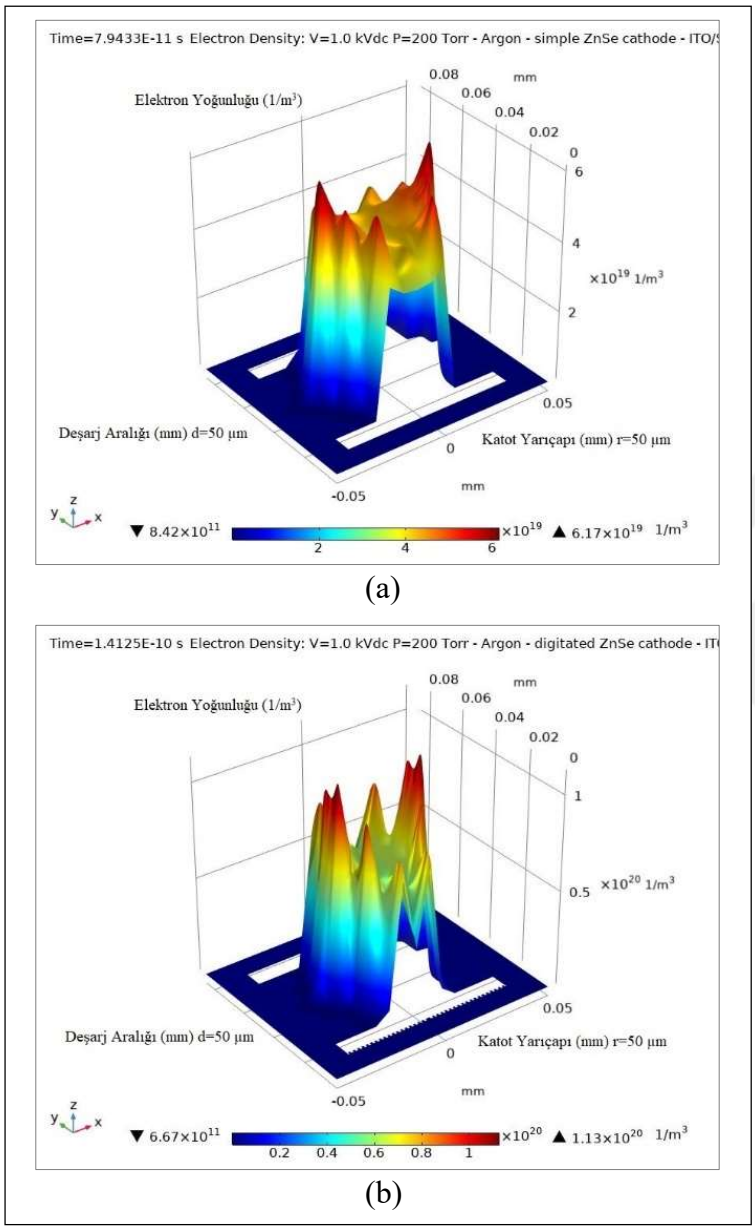
Şekil 3.8'de SİM-1 2D-$ED_{sekans\text{-}son}$ Ar-mikroplazma sistemine ait basit ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot modelleri için ED grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.8. SİM-1 2D-$ED_{sekans\text{-}son}$ Ar (a) basit, (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot

ED tepe noktası değerleri, basit düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $6{,}17x10^{19}$ ($1/m^3$), mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $1{,}13x10^{20}$ ($1/m^3$) elde edilmiştir. Katot elektron emisyon yüzeyinin mikro-desenli modellenmesi neticesinde, ED parametresinin genlik olarak yükseldiği ve uzay-zamansal dağılımının daha lokal bir alanda toplandığı görülmüştür.

Şekil 3.9'da SİM-1 3D-$ED_{sekans\text{-}son}$ Ar-mikroplazma sistemine ait basit ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot modelleri için ED grafikleri verilmiştir.

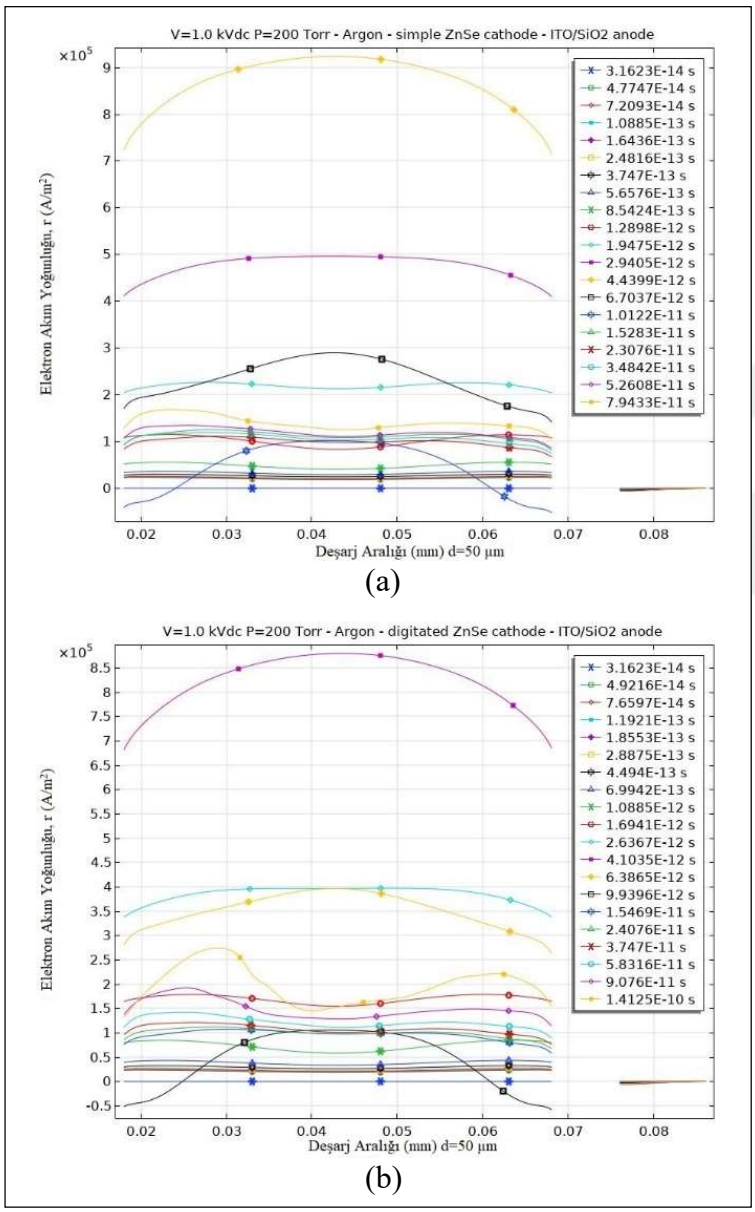


Şekil 3.9. SİM-1 3D-$ED_{sekans\text{-}son}$ Ar (a) basit, (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot

ED parametresi, argon reaktör hücresinde 10 µm ile 90 µm arasında geniş bir alanda dağılım göstermektedir. Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde ED parametresinin daha konsantrik ve elektron konsantrasyonunun daha lokalize olduğu multifilament yapıda geliştiği görülmüştür.

Elektron akım yoğunluğu (ECD)

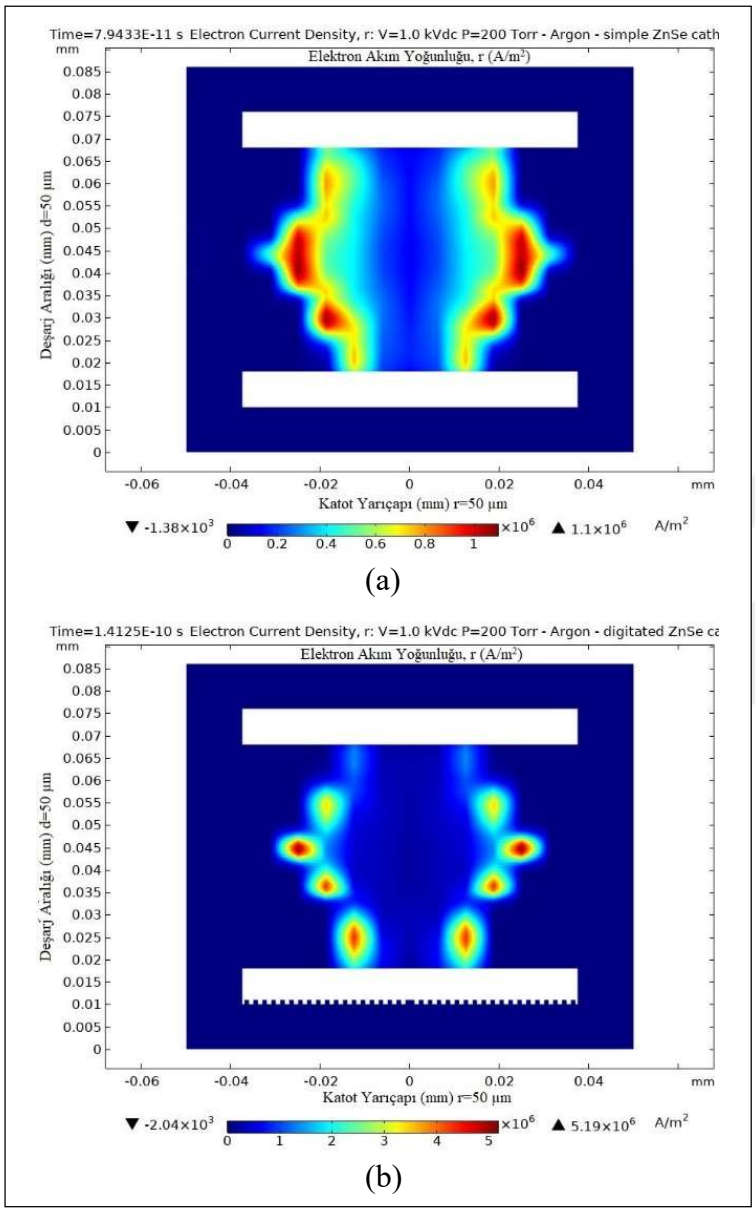
Şekil 3.10'da SİM-1 1D-ECD$_{sekans}$ Ar-mikroplazma sistemine ait basit ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot modelleri için ECD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.10. SİM-1 1D-ECD$_{sekans}$ Ar (a) basit, (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot

Basit düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $7{,}9433 \times 10^{-11}$ s ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}4125 \times 10^{-10}$ s aralığında gerçekleşen mikro deşarj reaksiyon sekanslarına ait ECD parametresinin deşarj aralığı boyunca değişim grafikleri verilmiştir. Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminin sekans periyodunun daha uzun olduğu görülmüştür.

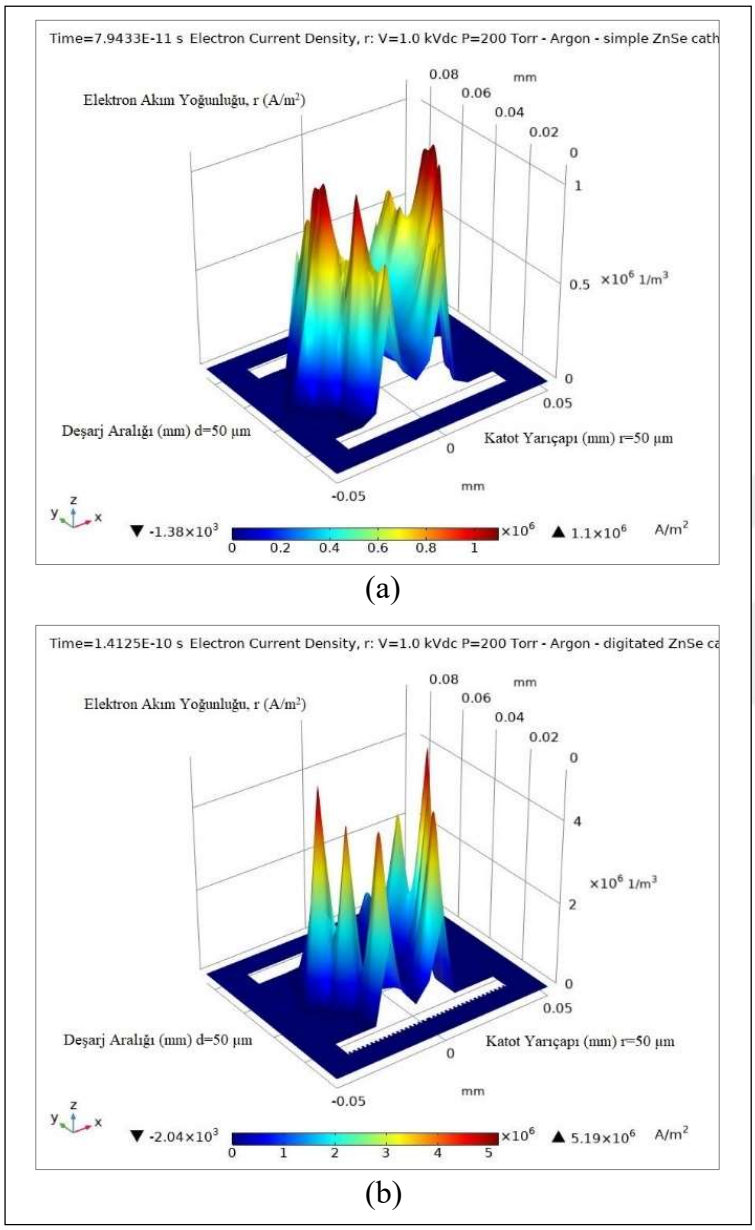
Şekil 3.11'de SİM-1 2D-ECD$_{sekans-son}$ Ar-GDSµP sistemine ait basit ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot modelleri için ECD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.11. SİM-1 2D-ECD$_{sekans-son}$ Ar (a) basit, (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot

ECD tepe noktası değerleri, sırasıyla, basit düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde 1,1x10^6 (A/m^2), mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde 5,19x10^6 (A/m^2) elde edilmiştir. Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde ECD parametresi multifilament formunda gelişmiştir. Katot elektron emisyon yüzeyinin mikro-desenlenmesi yöntemi ile ECD parametresinin genlik olarak yükseldiği ve uzay-zamansal dağılımının daha lokal ve konsantrik formda geliştiği görülmüştür.

Şekil 3.12'de SİM-1 3D-ECD$_{sekans-son}$ Ar-mikroplazma sistemine ait basit ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot modelleri için ECD grafikleri verilmiştir.

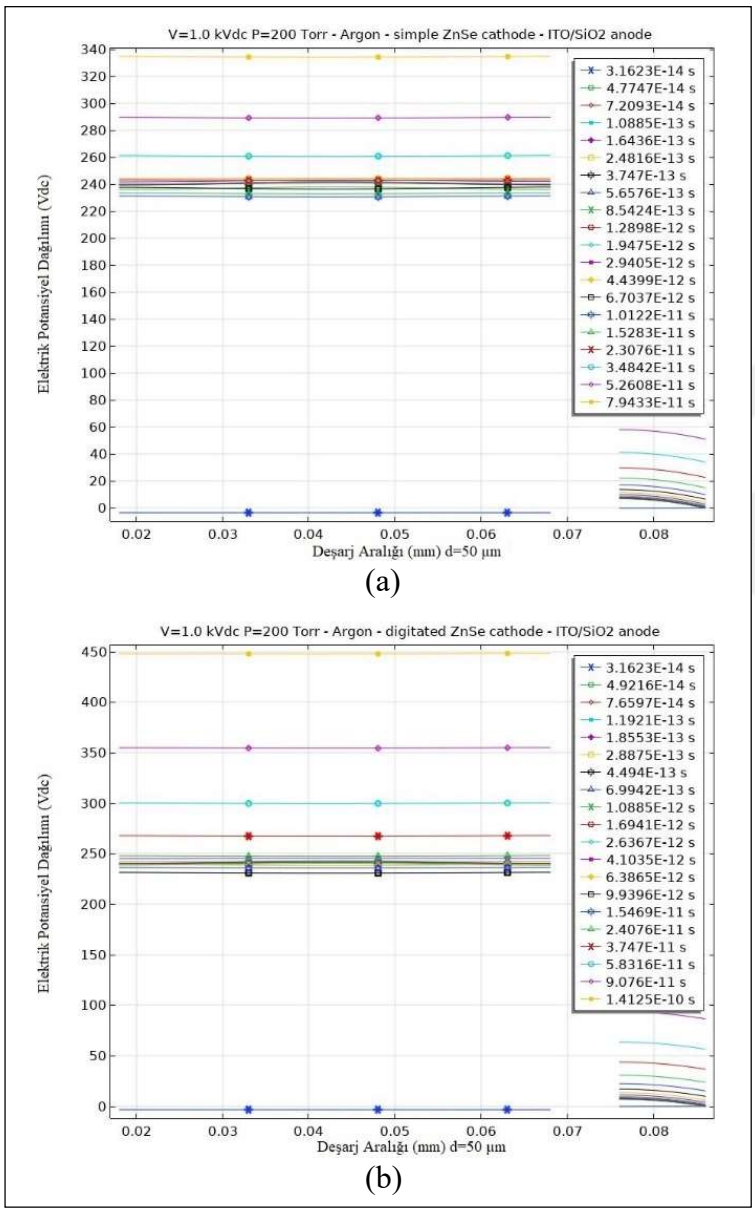


Şekil 3.12. SİM-1 3D-ECD$_{sekans-son}$ Ar (a) basit, (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot

Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde ECD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımının basit düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde ECD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımına kıyasla daha konsantrik multifilament formunda lokalize geliştiği görülmüştür.

Elektrik potansiyel dağılımı (EPD)

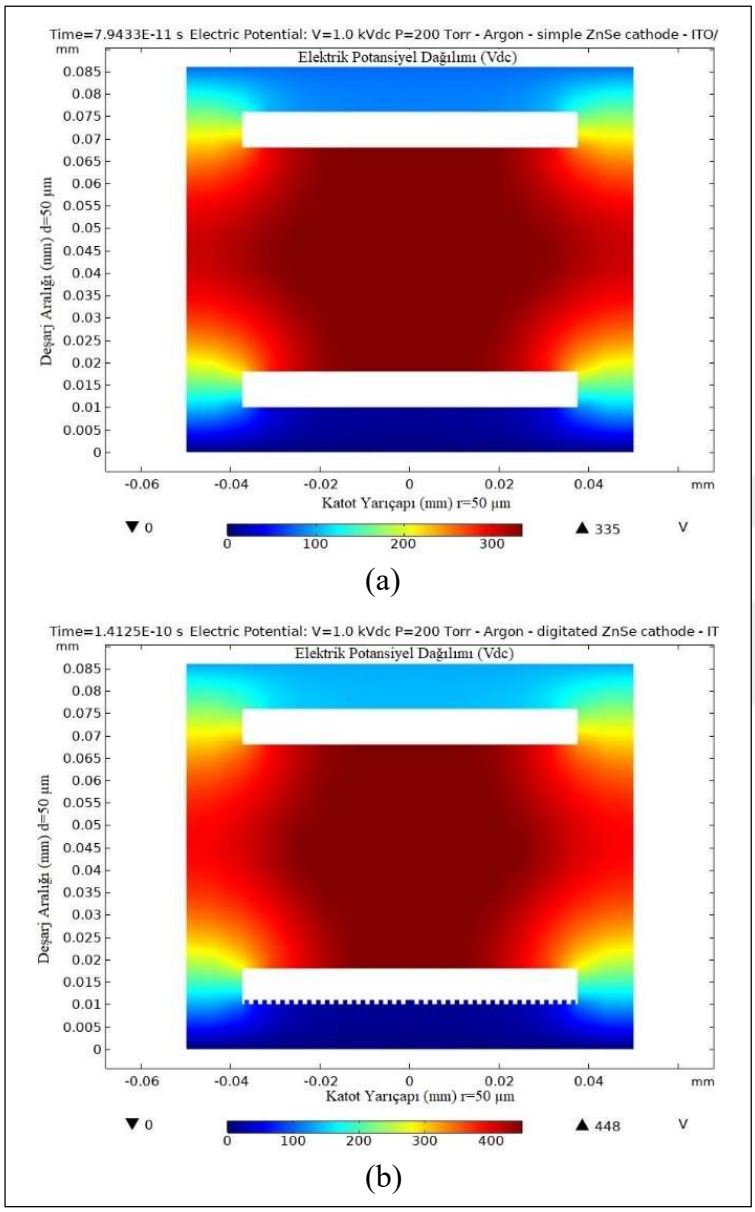
Şekil 3.13'te SİM-1 1D-EPD$_{sekans}$ Ar-mikroplazma sistemine ait basit ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot modelleri için EPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.13. SİM-1 1D-EPD$_{sekans}$ Ar (a) basit, (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot

Basit düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $7{,}9433 \times 10^{-11}$ s ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}4125 \times 10^{-10}$ s aralığında gerçekleşen mikro boşalma reaksiyon sekanslarına ait EPD parametresinin boşalma aralığı boyunca değişim grafikleri verilmiştir.

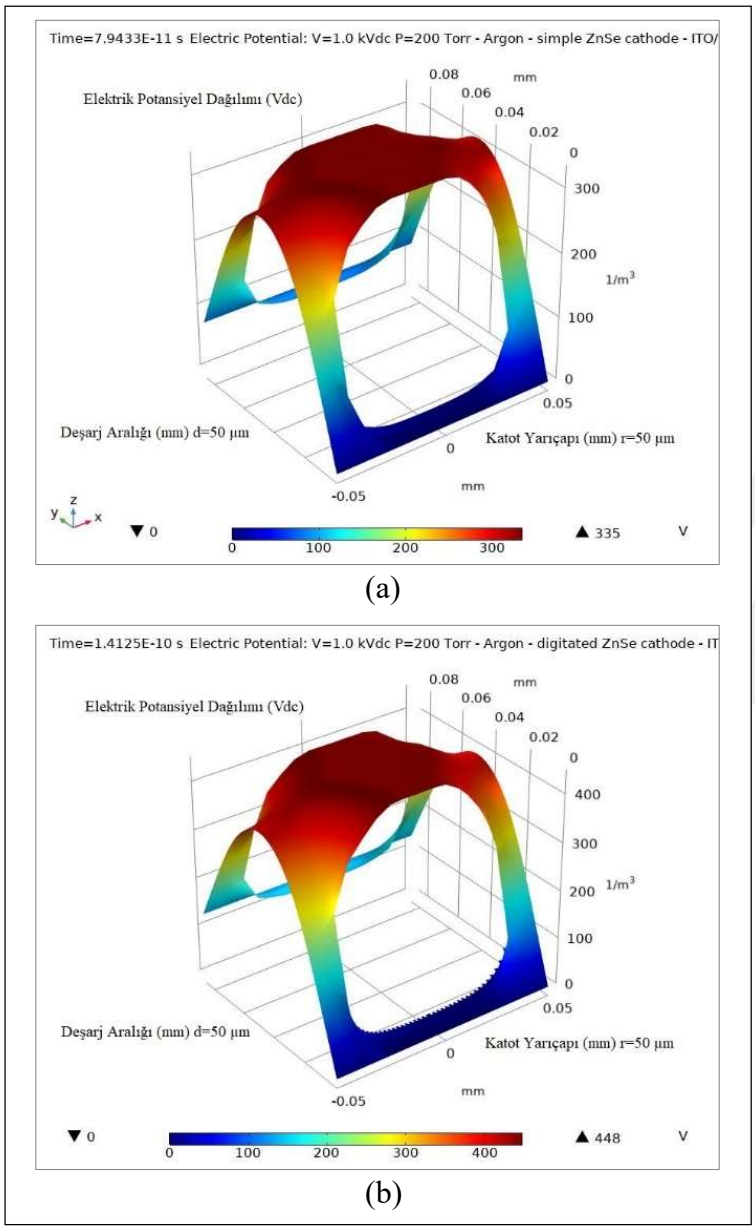
Şekil 3.14'te SİM-1 2D-EPD$_{sekans-son}$ Ar-mikroplazma sistemine ait basit ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot modelleri için EPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.14. SİM-1 2D-EPD$_{sekans-son}$ Ar (a) basit, (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot

Mikro boşalma reaksiyon sekansının son zaman diliminde EPD parametresi, basit düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde 335 V (t_s = 7,9433x10^{-11} s) ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde 448 V (t_s = 1,4125x10^{-10} s) olduğu görülmüştür. Mikro-desenli ZnSe katot Ar sisteminde oluşan EPD değerinin basit düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminden daha yüksek gerçekleştiği görülmüştür.

Şekil 3.15'te SİM-1 3D-EPD$_{sekans-son}$ Ar-mikroplazma sistemine ait basit ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot modelleri için EPD grafikleri verilmiştir.



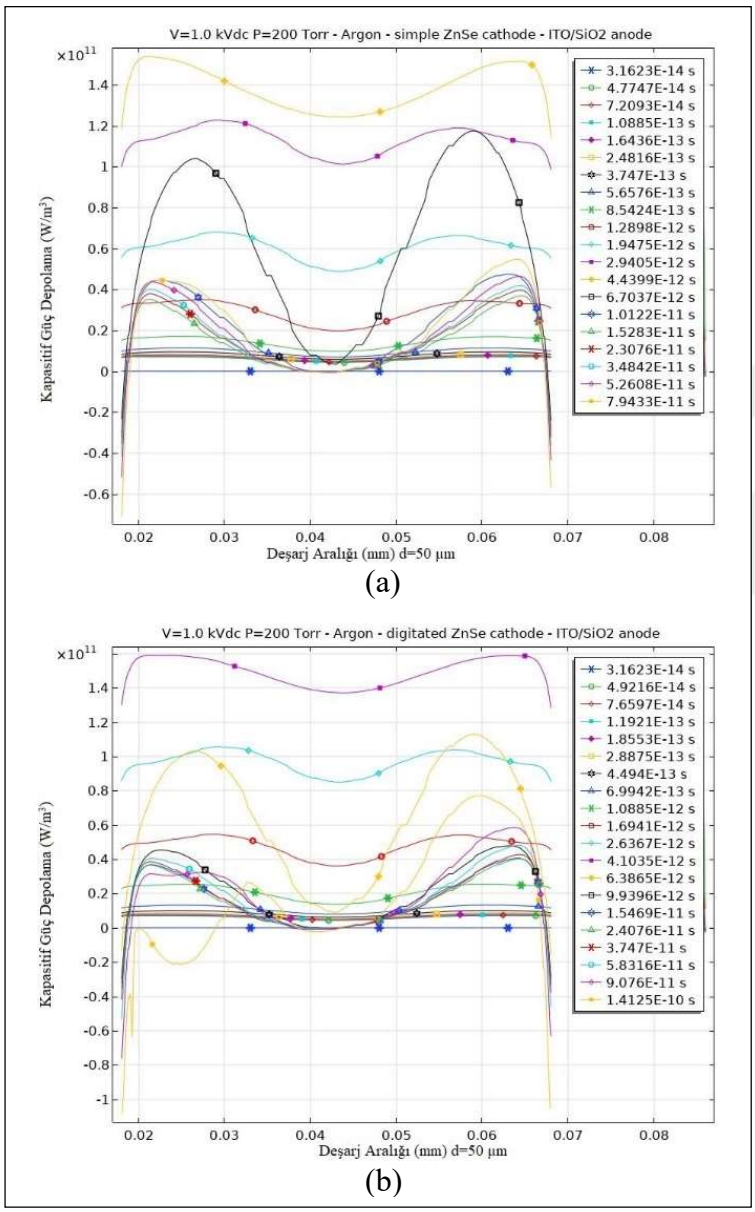
Şekil 3.15. SİM-1 3D-EPD$_{sekans-son}$ Ar (a) basit, (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot

Mikro boşalma reaksiyon sekansının son zaman diliminde EPD parametresinin boşalma aralığı (d = 50 µm) ve katot yarıçapı (r = 50 µm) eksenlerine göre değişim grafikleri verilmiştir.

Mikroplazmanın uzay-zamansal hızlı ve karmaşık değişimi, hücre boyunca EPD parametresinin homojenliğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu dağılım sabit tutulmazsa, katot ve anot elektrotları arasında farklı glow boşalma alanları oluşmaktadır.

Kapasitif güç depolama (CPD)

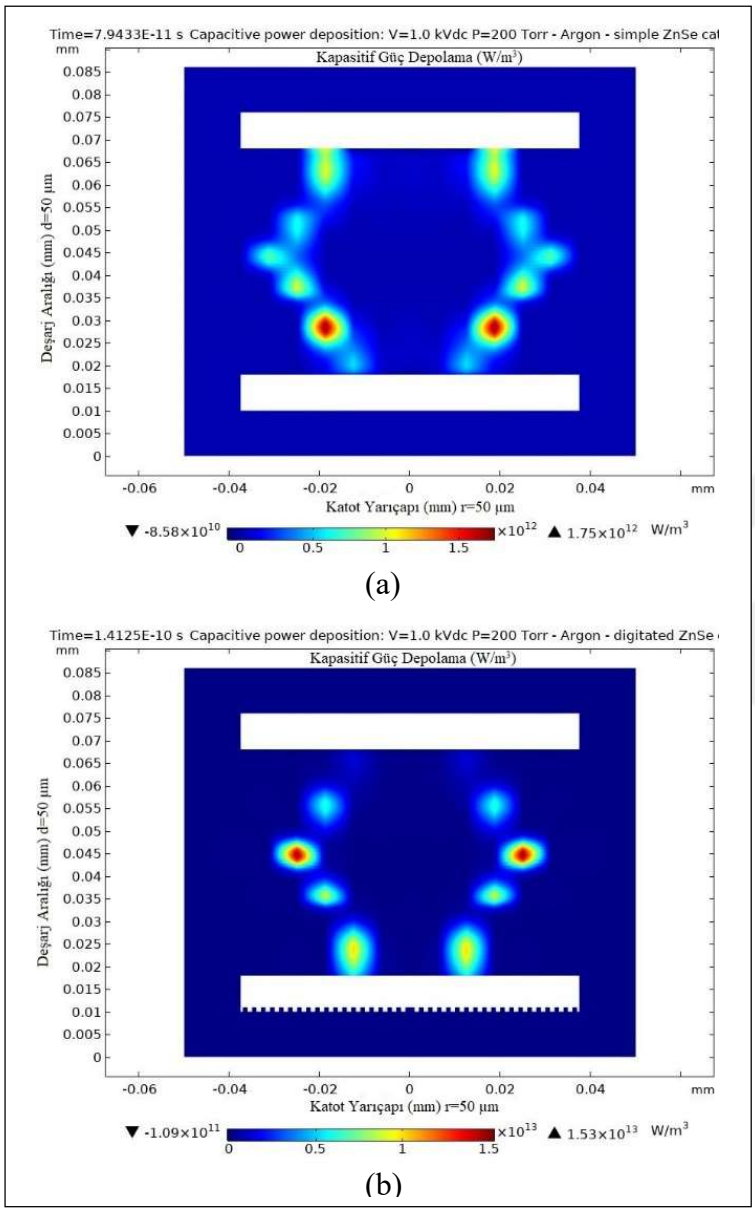
Şekil 3.16'da SİM-1 1D-CPD$_{sekans}$ Ar-mikroplazma sistemine ait basit ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot modelleri için CPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.16. SİM-1 1D-CPD$_{sekans}$ Ar (a) basit, (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot

Basit düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $7{,}9433 \times 10^{-11}$ s ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}4125 \times 10^{-10}$ s aralığında gerçekleşen mikro deşarj reaksiyon sekanslarına ait CPD parametresinin boşalma aralığı (d = 50 µm) boyunca değişim grafikleri ile verilmiştir.

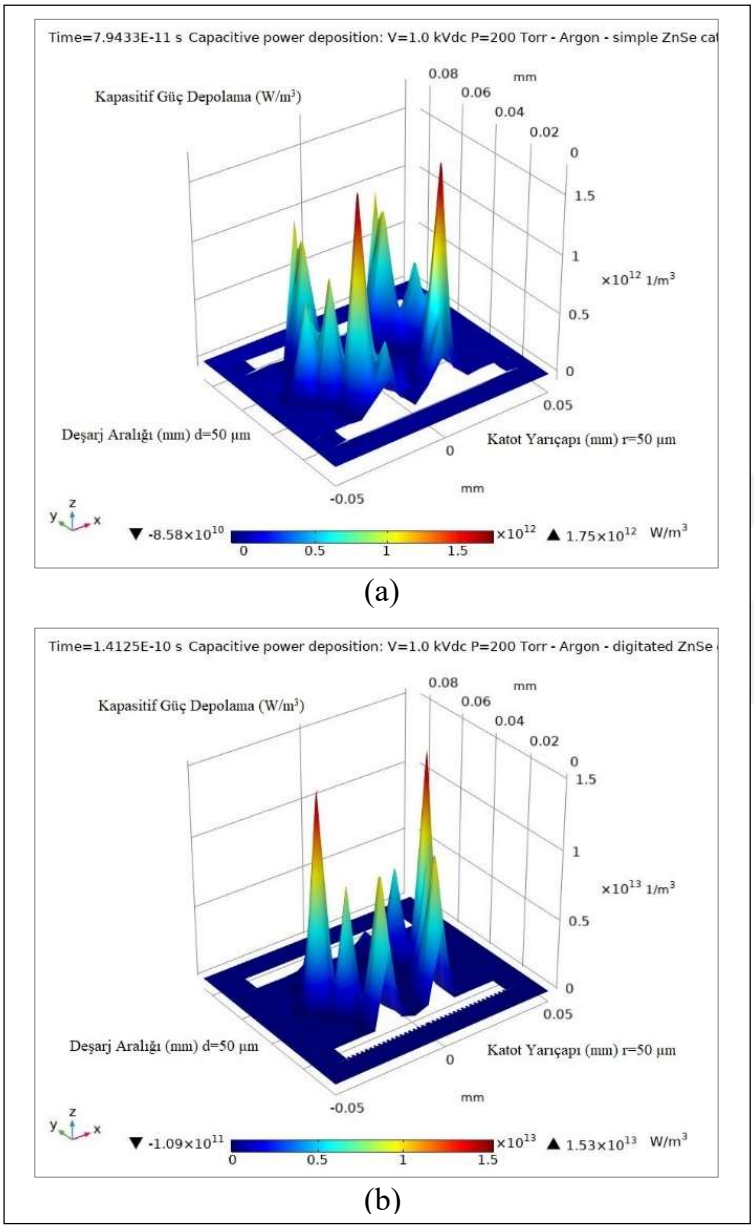
Şekil 3.17'de SİM-1 2D-CPD$_{sekans-son}$ Ar-mikroplazma sistemine ait basit ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot modelleri için CPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.17. SİM-1 2D-CPD$_{sekans-son}$ Ar (a) basit, (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot

Basit düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde 30 µm civarında tepe değeri 1,75x10^{12} (W/m^3) olan ve multifilament yapıda gelişen lokalize çift CPD yoğunluk alanının olduğu görülmüştür. Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde 45 µm civarında tepe değeri 1,53x10^{13} (W/m^3) olan ve multifilament yapıda gelişen lokalize çift CPD yoğunluk alanının olduğu görülmüştür. Modifiye ZnSe katot Ar sisteminde CPD parametresinin genlik değerinin arttığı daha lokalize ve kararlı geliştiği görülmüştür.

Şekil 3.18'de SİM-1 3D-$CPD_{sekans\text{-}son}$ Ar-mikroplazma sistemine ait basit ve mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot modelleri için CPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.18. SİM-1 3D-$CPD_{sekans\text{-}son}$ Ar (a) basit, (b) mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot

Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde gelişen CPD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımının basit düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde gelişen CPD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımına kıyasla, daha konsantrik, kararlı, homojen multifilament yapıda, daha lokalize geliştiği görülmektedir. Mikroplazmanın termodinamik kararsız doğası, reaktörde elektriksel kırılım meydana gelmeden önce önemli miktarda güç kaybına neden olmaktadır.

Çizelge 3.2'de SİM-1 simülasyon çalışmasında elde edilen parametre verileri özetlenmiştir.

Çizelge 3.2. SİM-1 simülasyon çalışmasına ait sonuç verileri

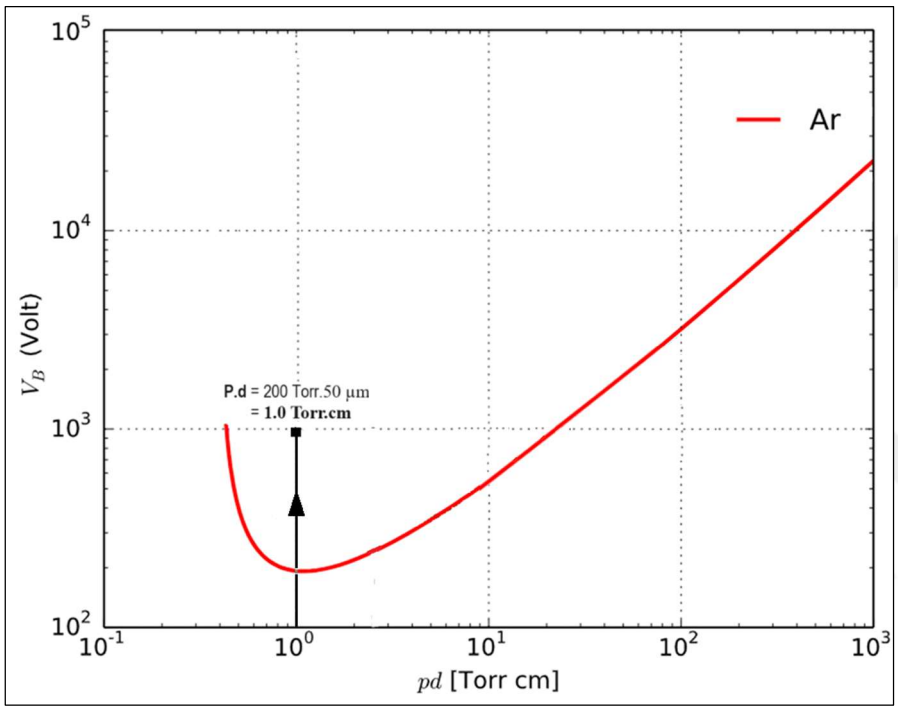
	Gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma sistemi (GDSμP)	
Model ►	Temel Model	Modifiye Model
Parametre▼	ZnSe-Ar Basit düzlemsel katot	ZnSe-Ar Mikro-desenli düzlemsel katot
SS_o	Simülasyon sekans başlangıç (s):	
	$3{,}1623x10^{-14}$	$3{,}1623x10^{-14}$
SS_s	Simülasyon sekans son (s):	
	$7{,}9433x10^{-11}$	$1{,}4125x10^{-10}$
ED_0	Elektron yoğunluğu, sekans-başlangıç ($1/m^3$)	
	$1{,}00x10^{17}$	$1{,}00x10^{17}$
ED_s	Elektron yoğunluğu, sekans-son ($1/m^3$)	
	$6{,}17x10^{19}$	$1{,}13x10^{20}$
ECD_s	Elektron akım yoğunluğu, sekans-son (A/m^2)	
	$1{,}10x10^{6}$	$5{,}19x10^{6}$
EPD_s	Elektrik potansiyel dağılımı, sekans-son (V)	
	335	448
CPD_s	Kapasitif güç depolama, sekans-son (W/m^3)	
	$1{,}75\ x10^{12}$	$1{,}53\ x10^{13}$

Çizelge 3.2 simülasyon verilerine göre;

1) Mikro-desenli ZnSe katot Ar mikroplazma sistemindeki elektron yoğunluğu (ED_s) değeri genlik olarak, basit düzlemsel ZnSe katot Ar mikroplazma sisteminden yaklaşık 1,8 kat yüksektir.
2) Mikro-desenli ZnSe katot Ar mikroplazma sistemindeki elektron akım yoğunluğu (ECD_s) değeri genlik olarak, basit düzlemsel ZnSe katot Ar mikroplazma sisteminden yaklaşık 4,7 kat yüksektir.
3) Mikro-desenli ZnSe katot Ar mikroplazma sistemindeki elektrik potansiyel dağılım (EPD_s) değeri genlik olarak, basit düzlemsel ZnSe katot Ar mikroplazma sisteminden yaklaşık 113 VDC daha yüksektir.
4) Mikro-desenli ZnSe katot Ar mikroplazma sistemindeki kapasitif güç depolama (CPD_s) değeri genlik olarak, basit düzlemsel ZnSe katot Ar mikroplazma sisteminden yaklaşık 8,7 kat yüksektir.

Bir gaz ortamının elektriksel kırılımı (V_{BD}); gaz basıncı (P, Torr) ve anot-katot elektrotlar arası boşalma aralığı (d, cm) çarpımı P.d (Torr.cm) Paschen çarpımı ifadesi ile tanımlanmıştır.

Şekil 3.19'da SİM-1 hücre modelinde kullanılan argon plazma reaktörünün çalışma bölgesi Paschen eğrisi üzerinde P.d = 1,0 Torr.cm çarpımı ile gösterilmiştir.



Şekil 3.19. SİM-1 Ar-Paschen çalışma bölgesi (1,0 Torr.cm)

SİM-1 simülasyon sayısal analiz çalışmamız neticesinde; mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot elektrota sahip Ar mikroplazma modülünün, basit düzlemsel ZnSe katot elektrota sahip Ar mikroplazma modülünden elektron yoğunluğu, elektron akım yoğunluğu ve kapasitif güç depolama parametreleri kıyaslandığında daha kararlı ve yüksek verimde çalışacağı sonucuna varılmıştır [68-71]. Tez çalışmamız kapsamında hedeflenen katot elektron emisyon yüzeyinin mikro-desenlemesinin mikroplazma deşarj parametreleri üzerindeki pozitif katkısı SİM-1 sayısal simülasyon çalışması neticesinde anlaşılmıştır. Sonraki simülasyon çalışmalarımızda mikro-desenli katot elektrot elemanı sistemde modellenmiştir.

Müteakip simülasyon modelimiz SİM-2'de, mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot elektrota sahip Ar/H_2 ikili gaz karışım reaktör ortamının mikroplazma parametreleri (ED, ECD, EPD, CPD) üzerindeki uzay-zamansal etkisi analiz edilmiştir.

3.2.2. Simülasyon analiz çalışması (SİM-2)

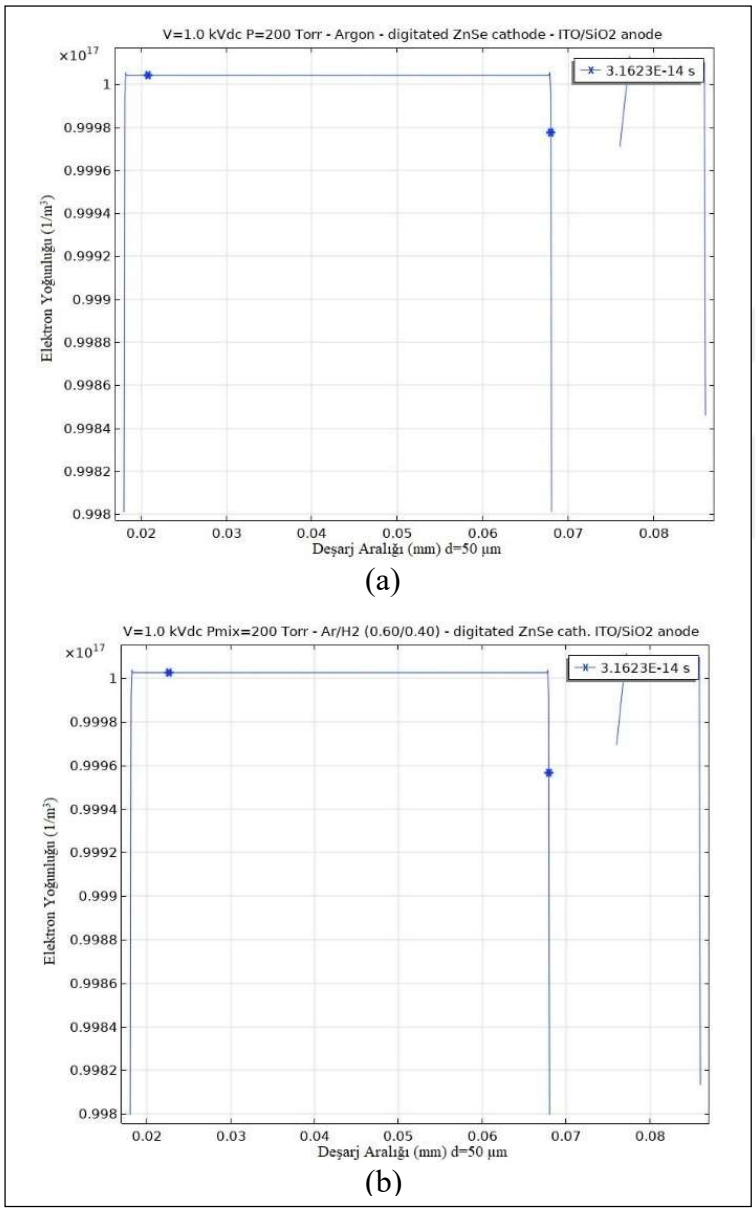
İki boyutlu düzlemsel kare geometriye sahip doğru akım (DC) beslemeli gaz boşalma-yarıiletken (ZnSe) mikroplazma sisteminin (GDSμPS) mikro ölçekli modeli FEM çözücü COMSOL Multifizik DC plazma simülasyon programını kullanarak elektron yoğunluğu (ED), elektron akım yoğunluğu (ECD), elektrik potansiyel dağılımı (EPD) ve kapasitif güç depolama (CPD) temel boşalma parametreleri sayısal olarak analiz edildi. Mikroplazma reaksiyon sürecinin uzay-zamansal dinamik davranışı grafik ortamda kapsamlı bir şekilde incelendi. Çizelge 3.3'te SİM-2 simülasyon çalışmasına ait parametre tanımları verilmiştir.

Çizelge 3.3. SİM-2 simülasyon çalışmasına ait parametre tanımları

Parametre	Tanım	
Simülasyon Çalışması Kodu	SİM-2	
GDSμPS (gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma sistemi)	ZnSe-Ar	ZnSe-Ar/H_2
Simülasyon Modelleri	Modifiye model	Modifiye/Karışım model
Hücre yapısı	İki-boyutlu kare geometrili düzlemsel reaktör	
Hücre besleme gerilimi	V = 1,0 kVDC	
Plazma proses gaz tipi ve karışım oranı	Argon (Ar)	Argon/hidrojen karışımı Ar/H_2 (3:2)
Plazma proses gaz basıncı	P = 200 Torr	
Elektrotlar arası mesafe (anot-katot)	d = 50 μm	
Fotokatot elektrot malzemesi	Çinko selenit (ZnSe) yarıiletken (Adachi ve Taguchi, 1991)	
Fotokatot elektrot elektriksel kontak malzemesi	Altın (Au) ince-film (Johnson ve Christy 1972: n, k 0.188-1.937 μm)	
Fotokatot elektron emisyon yüzeyi	Mikro-desenli düzlemsel 1,0 μm 1,0 μm 1,0 μm periyodik kare morfoloji	
Fotokatot elektrot çapı	r = 50 μm	
Anot elektrot malzemesi	Silika (SiO_2) (Malitson 1965: Fused silica; n 0,21-6,7 μm)	
Anot elektrot elektriksel kontak malzemesi	İndiyum kalay oksit (ITO) ince-film (Moerland ve Hoogenboom 2016: n,k 0,4-1,0 μm)	
Gaz ortamdaki başlangıç (tohum) elektron yoğunluğu	$n_{e,o} = 1{,}0x10^{17}$ $(1/m^3)$	
Paschen çarpımı	P.d = 200 Torr.50 μm = 1,0 Torr.cm	
Hücre çalışma ortam sıcaklığı	T = 300 K	

Elektron yoğunluğu (ED)

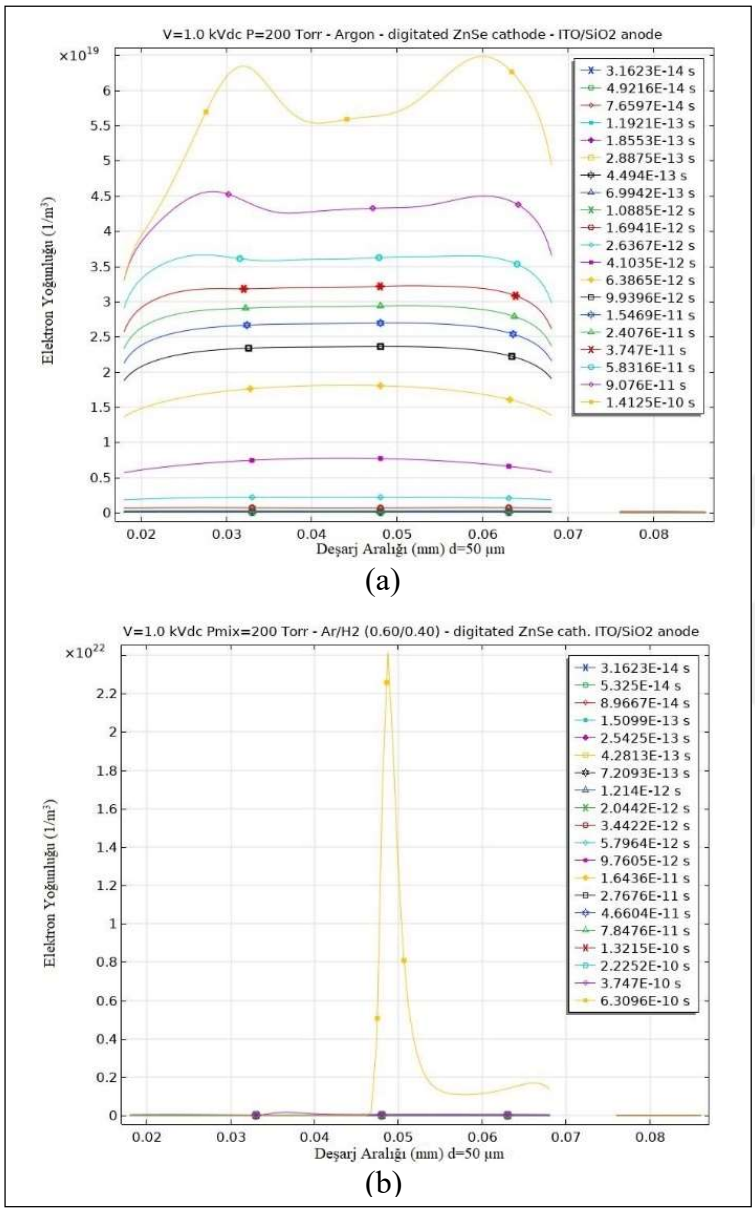
Şekil 3.20'de SİM-2 1D-$ED_{sekans\text{-}başlangıç}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için ED grafikleri verilmiştir. Reaktör gaz ortamdaki başlangıç elektron yoğunluk değeri hesaplamalarda $1{,}0x10^{17}$ ($1/m^3$) alınmıştır.



Şekil 3.20. SİM-2 1D-$ED_{sekans\text{-}başlangıç}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Başlangıçta (t_0=$3{,}1623x10^{-14}$ s) arka plan iyonizasyon reaksiyonları devam etmesine rağmen, Townsend (TA) iyonizasyon reaksiyon süreci henüz başlamadığından ve gaz ortamın elektriksel kırılımı (V_{BD}) gerçekleşmediğinden dolayı ED parametresi, reaktör odacığında kararsız ve ortalama bir dağılım göstermektedir.

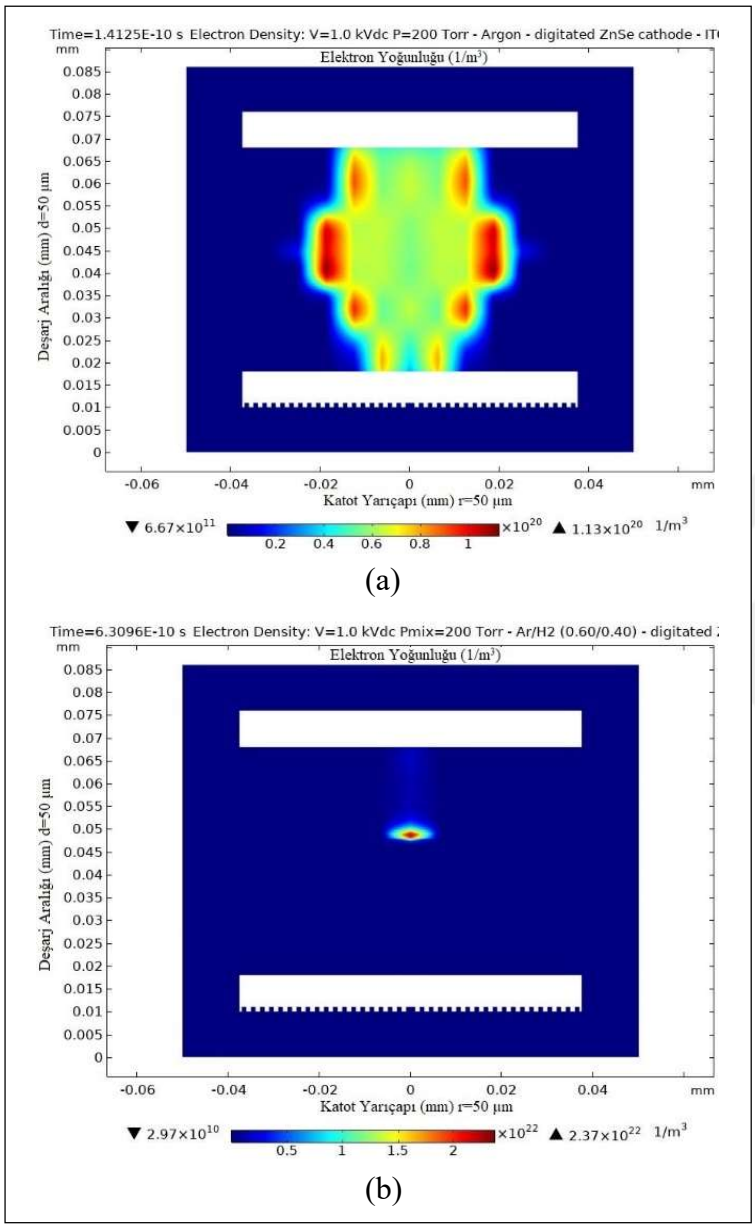
Şekil 3.21'de SİM-2 1D-ED_{sekans} mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için ED grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.21. SİM-2 1D-ED_{sekans} mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Karşılaştırmalı modellerin mikroplazma reaksiyon sekansları, simülasyon zaman cetvelinde sırasıyla, mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $1{,}4125 \times 10^{-10}$ s ve Ar/H_2 (60:40) sisteminde $6{,}3096 \times 10^{-10}$ s zaman diliminde tamamlanmıştır. ED parametresi, farklı tipteki gaz sistemlerinin (Ar, Ar/H_2) aynı elektron emisyon yüzey morfolojisine sahip katot modellerinde (mikro-desenli) karakteristik uzay-zamansal davranış sergilemiştir. ED parametresinin, Ar/H_2 sisteminde Maxwell dağılım fonksiyonu davranışını takip ettiği görülmüştür.

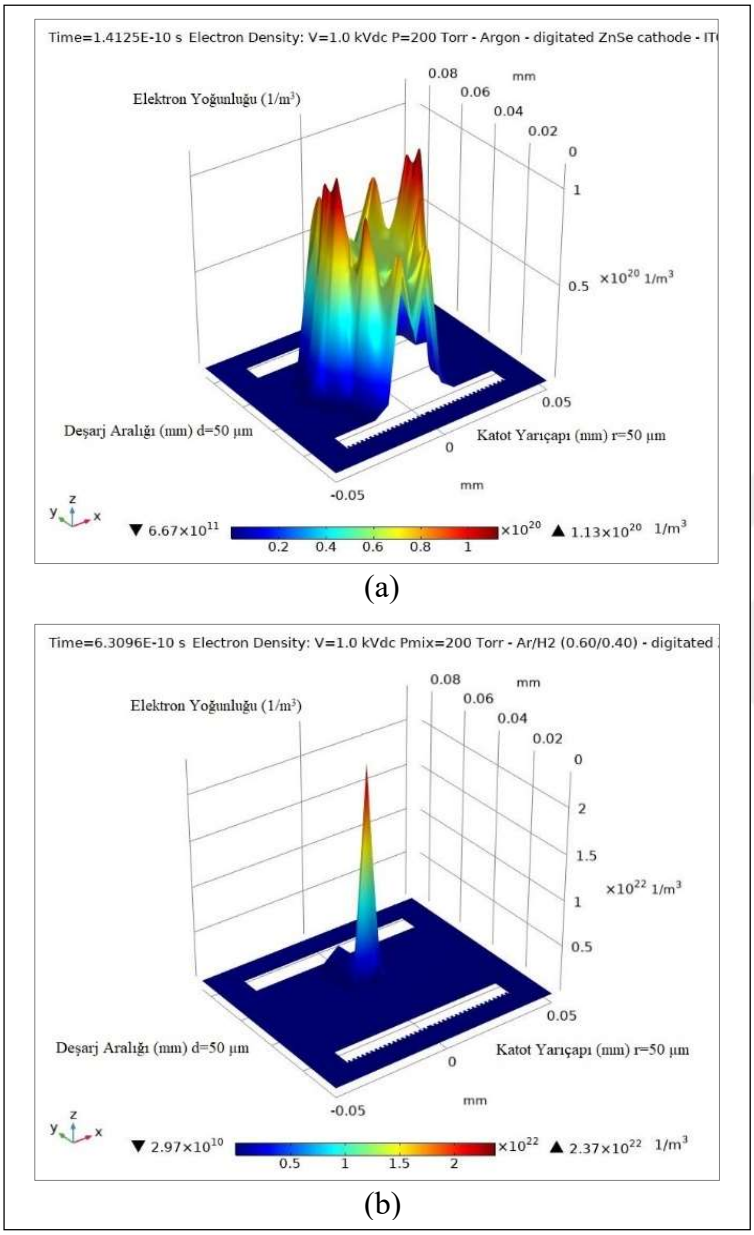
Şekil 3.22'de SİM-2 2D-$ED_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ED grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.22. SİM-2 2D-$ED_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

ED tepe noktası değerleri, sırasıyla, mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde 1,13x10^{20} (1/m^3), Ar/H_2 (60:40) sisteminde 2,37x10^{22} (1/m^3) elde edilmiştir. Ar/H_2 ikili gaz karışım modelinde ED parametresinin genlik olarak yükseldiği ve uzay-zamansal dağılımının reaktör hücre içinde lokal ve merkezi dar bir alanda toplandığı görülmüştür.

Şekil 3.23'te SİM-2 3D-$ED_{sekans\text{-}son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ED grafikleri verilmiştir.

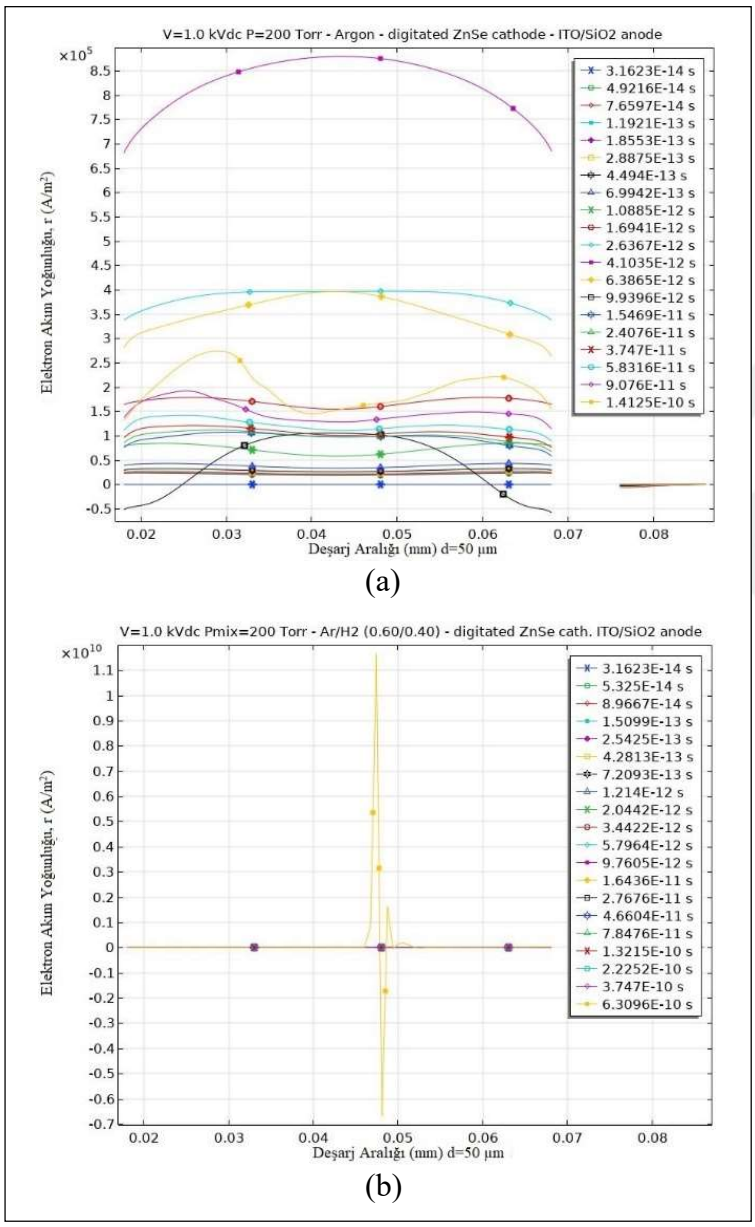


Şekil 3.23. SİM-2 3D-$ED_{sekans\text{-}son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

ED parametresi, Ar sisteminde 10 µm-90 µm arasında geniş bir alanda multifilament yapıda dağılım gösterirken, Ar/H_2 (60:40) sisteminde 47 µm-55 µm arasında dar bir alanda konsantrik ve lokalize tek filament yapıda gelişmiştir.

Elektron akım yoğunluğu (ECD)

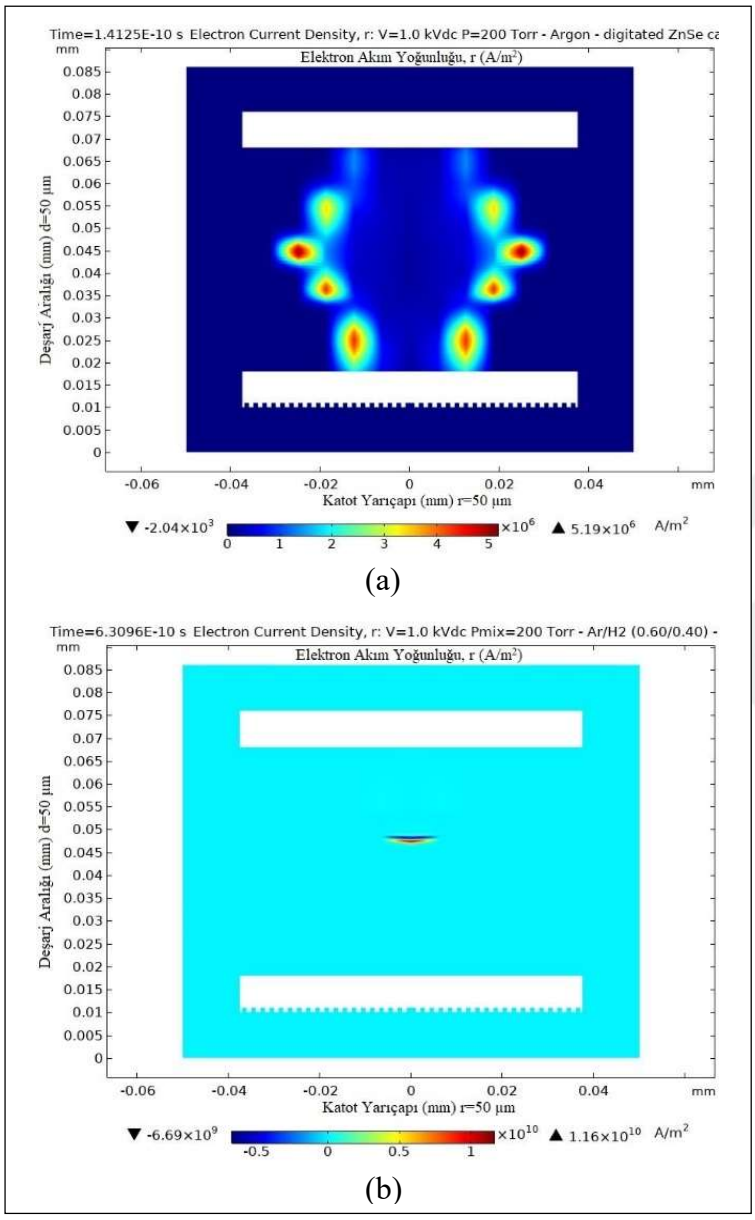
Şekil 3.24'te SİM-2 1D-ECD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ECD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.24. SİM-2 1D-ECD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $3{,}1623x10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}4125x10^{-10}$ s ve Ar/H_2 sisteminde $3{,}1623x10^{-14}$ s ≤ t ≤ $6{,}3096x10^{-10}$ s aralığında gerçekleşen mikro boşalma reaksiyon sekanslarına ait ECD parametresinin deşarj aralığı (d = 50 µm) boyunca değişim grafikleri verilmiştir.

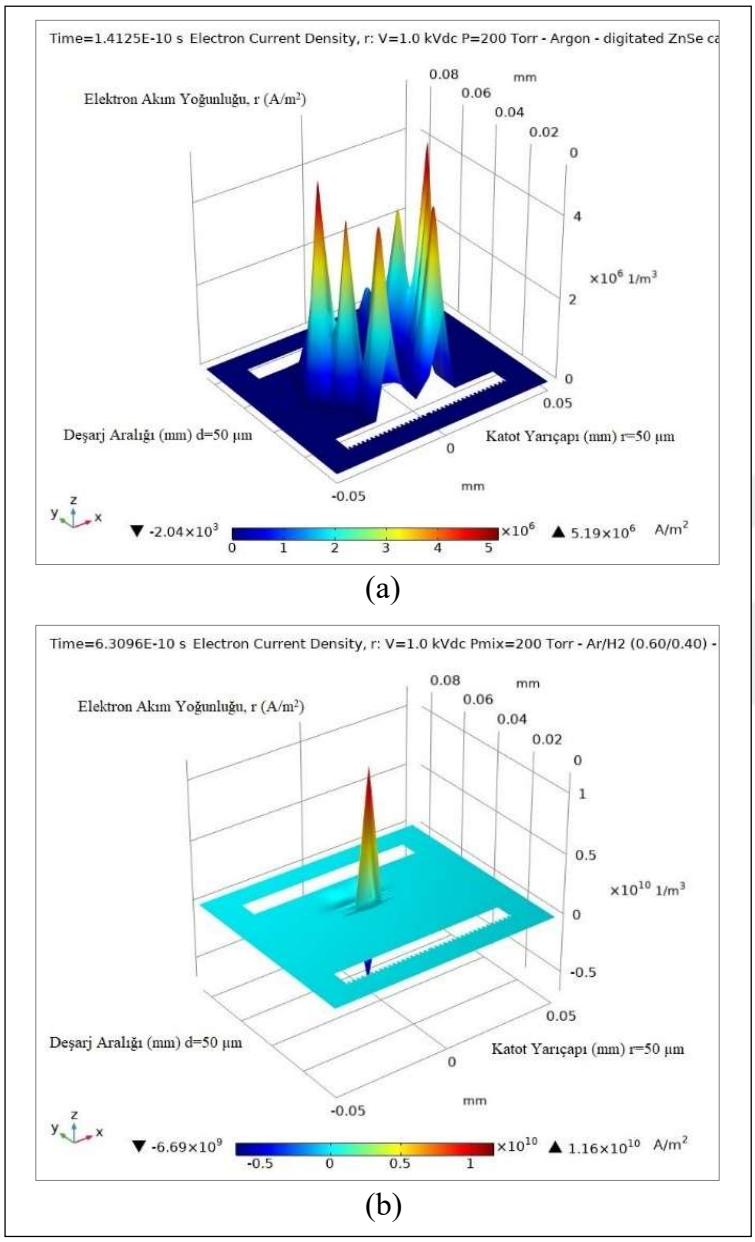
Şekil 3.25'te SİM-2 2D-ECD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ECD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.25. SİM-2 2D-ECD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

ECD tepe noktası değerleri, sırasıyla, mikro-desenli düzlemsel katot Ar sisteminde 5,19x10^6 (A/m^2), mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar/H_2 (60:40) sisteminde 1,16x10^{10} (A/m^2) elde edilmiştir. Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar/H_2 gaz karışımlı deşarj sisteminde ECD parametresinin genlik olarak yükseldiği ve uzay-zamansal dağılımının daha lokalize ve konsantrik tek filament formunda geliştiği görülmüştür.

Şekil 3.26'da SİM-2 3D-$ECD_{sekans\text{-}son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ECD grafikleri verilmiştir.

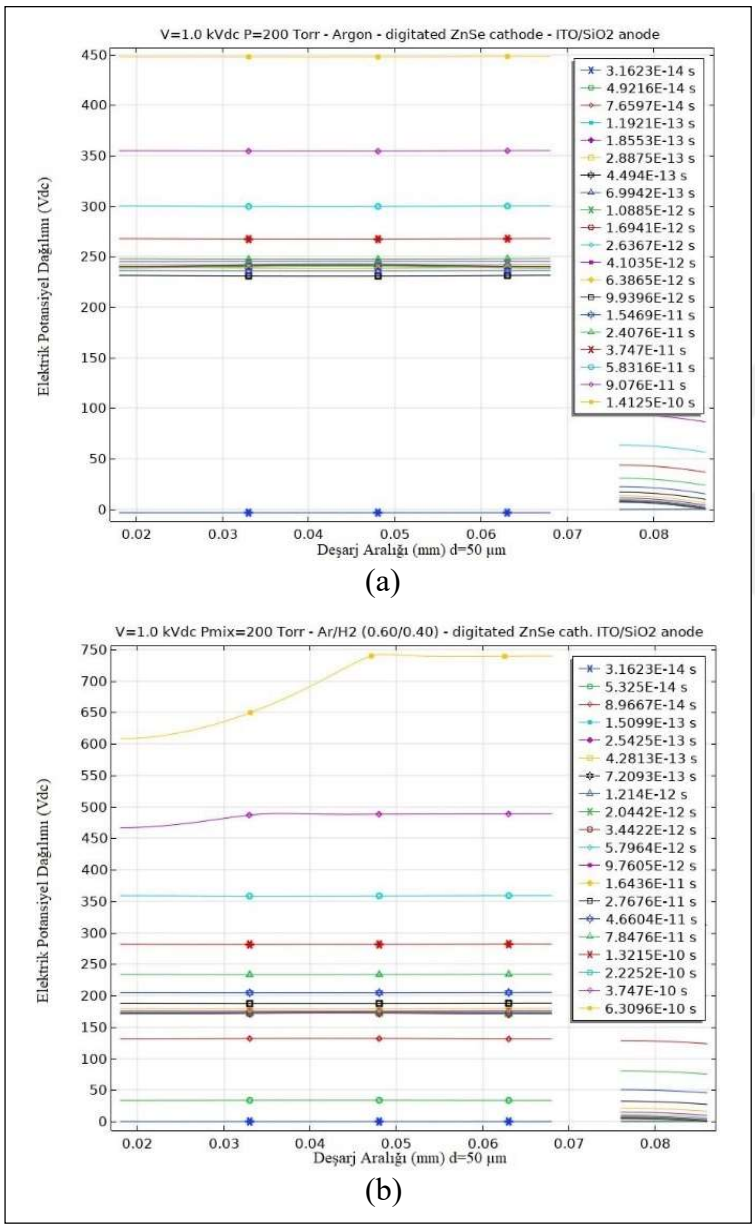


Şekil 3.26. SİM-2 3D-$ECD_{sekans\text{-}son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde ECD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımının multifilament formda geliştiği, Ar/H_2 (60:40) sisteminde ECD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımının tek filament yapıda konsantrik ve lokalize geliştiği görülmüştür.

Elektrik potansiyel dağılımı (EPD)

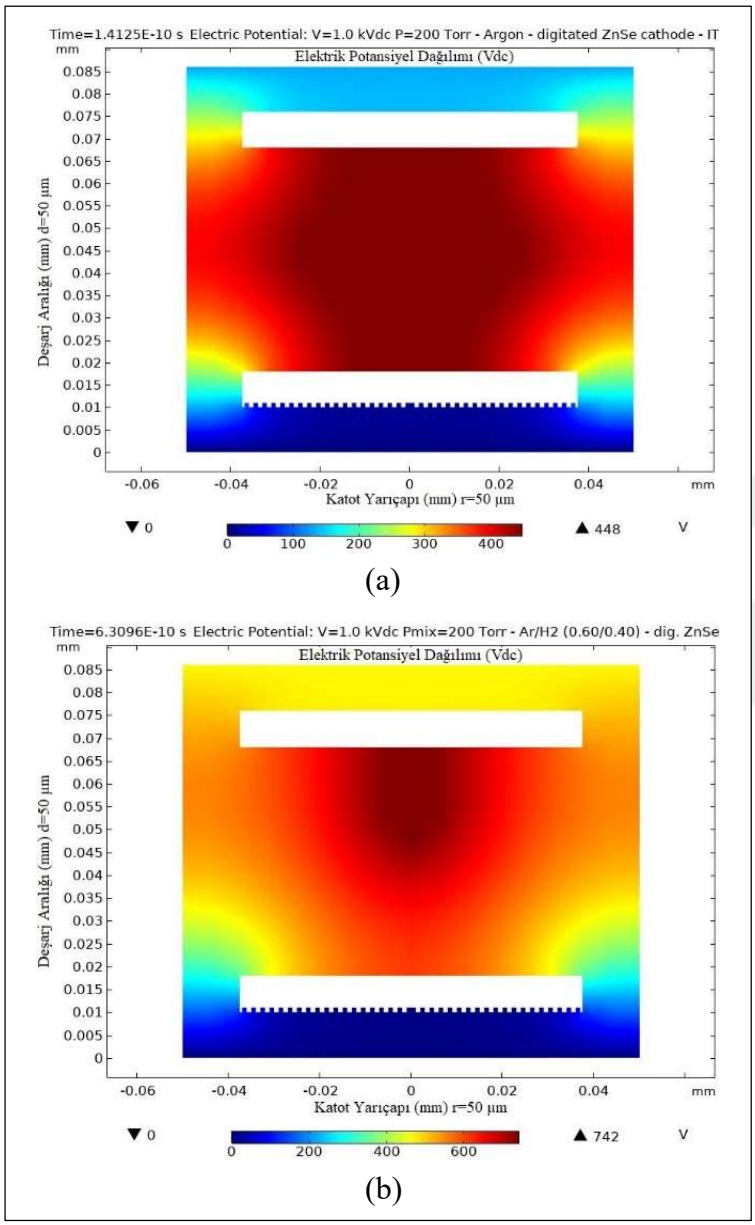
Şekil 3.27'de SİM-2 1D-EPD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için EPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.27. SİM-2 1D-EPD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $3{,}1623\text{x}10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}4125\text{x}10^{-10}$ s ve Ar/H_2 sisteminde $3{,}1623\text{x}10^{-14}$ s ≤ t ≤ $6{,}3096\text{x}10^{-10}$ s aralığında gerçekleşen mikro boşalma reaksiyon sekanslarına ait EPD parametresinin deşarj aralığı boyunca değişim grafikleri verilmiştir.

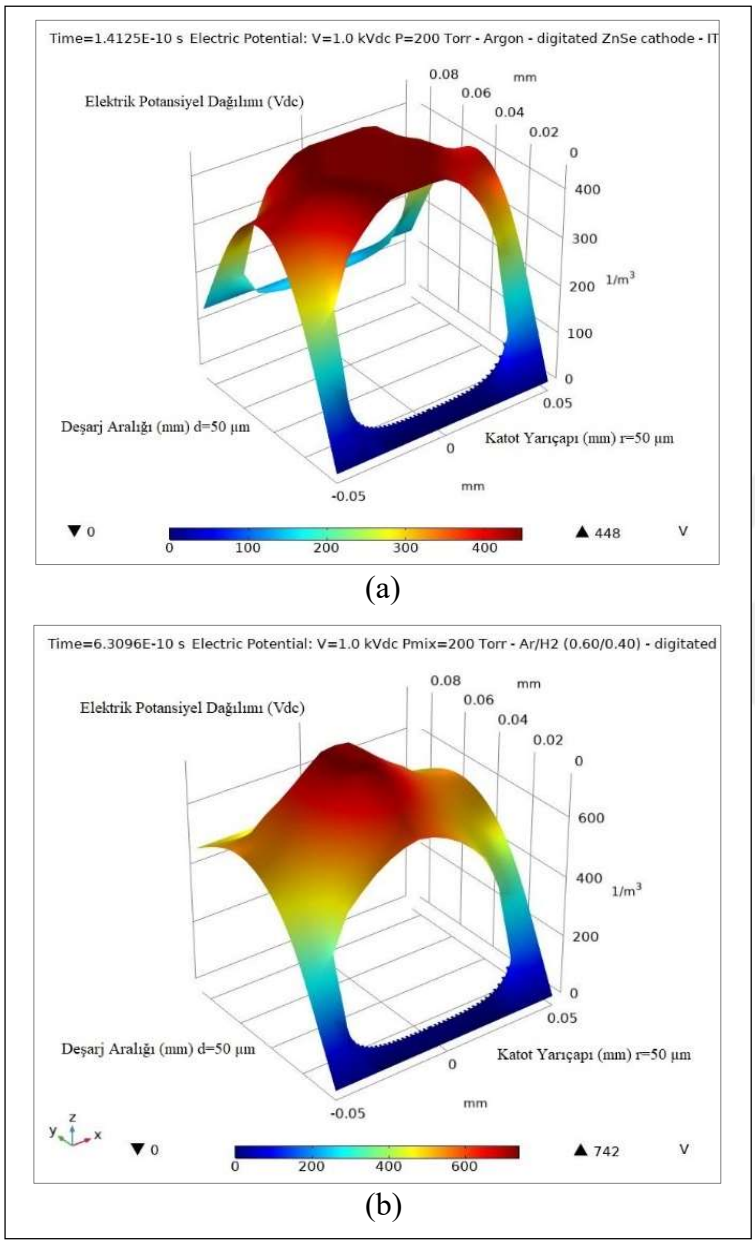
Şekil 3.28'de SİM-2 2D-EPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için EPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.28. SİM-2 2D-EPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro deşarj reaksiyon sekansının son zaman diliminde EPD parametresi, mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde 448 V (t_s = 1,4125x10^{-10} s) ve Ar/H_2 sisteminde 742 V (t_s = 6,3096x10^{-10} s) olduğu görülmüştür. Ar/H_2 sisteminde oluşan EPD değerinin Ar sisteminden daha yüksek gerçekleştiği görülmüştür.

Şekil 3.29'da SİM-2 3D-EPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için EPD grafikleri verilmiştir.

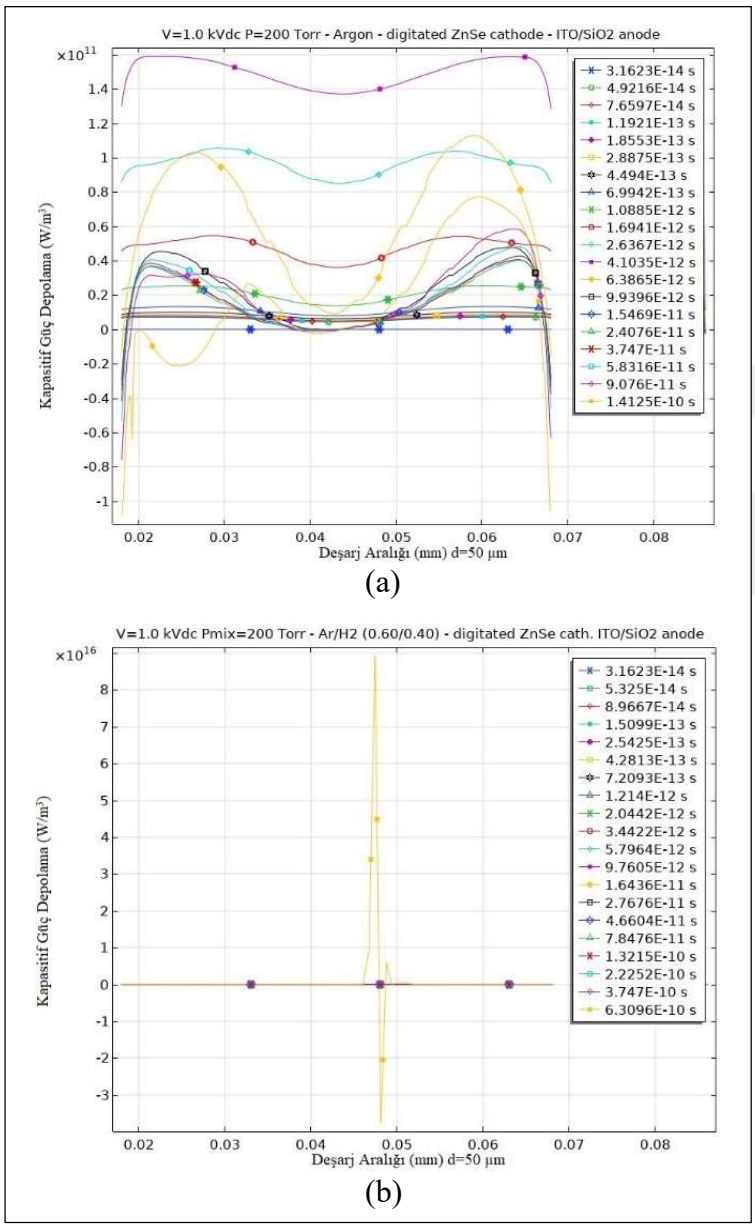


Şekil 3.29. SİM-2 3D-EPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro boşalma reaksiyon sekansının son zaman diliminde EPD parametresinin deşarj aralığı (d = 50 µm) ve katot yarıçapı (r = 50 µm) eksenlerine göre değişim grafikleri verilmiştir. Mikroplazmanın uzay-zamansal hızlı ve karmaşık değişimi, hücre boyunca EPD parametresinin homojenliğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu dağılım sabit tutulmazsa, katot ve anot elektrotları arasında farklı glow boşalma alanları oluşmaktadır.

Kapasitif güç depolama (CPD)

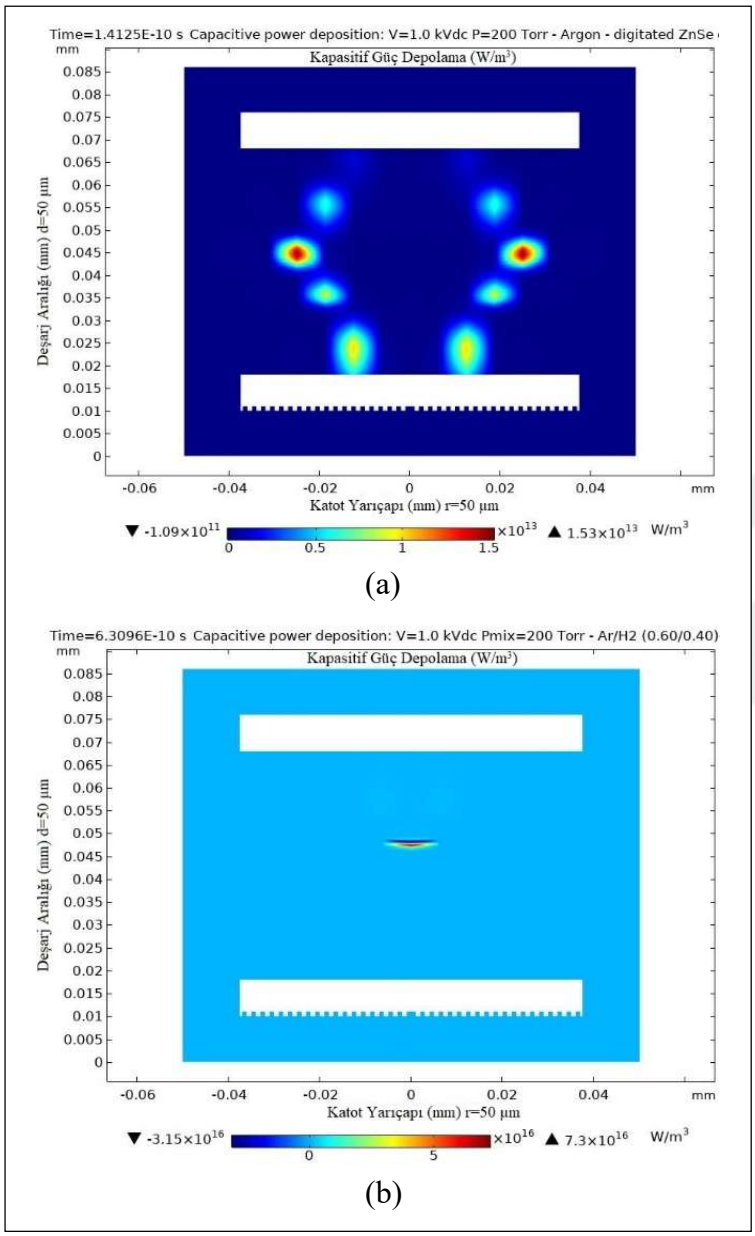
Şekil 3.30'da SİM-2 1D-CPD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için CPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.30. SİM-2 1D-CPD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $3{,}1623\text{x}10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}4125\text{x}10^{-10}$ s ve Ar/H_2 sisteminde $3{,}1623\text{x}10^{-14}$ s ≤ t ≤ $6{,}3096\text{x}10^{-10}$ s aralığında gerçekleşen mikro boşalma reaksiyon sekanslarına ait CPD parametresinin deşarj aralığı (d = 50 µm) boyunca değişim grafikleri verilmiştir.

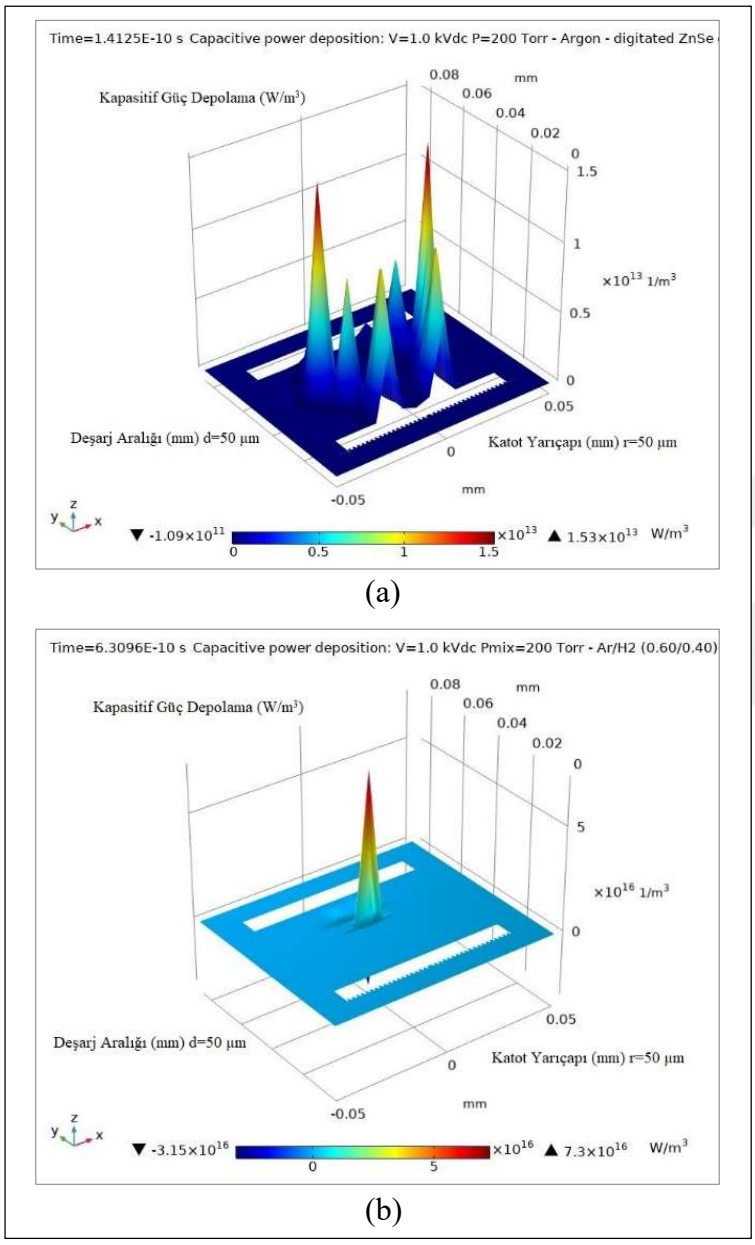
Şekil 3.31'de SİM-2 2D-$CPD_{sekans\text{-}son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için CPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.31. SİM-2 2D-$CPD_{sekans\text{-}son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Ar sisteminde 45 µm civarında tepe değeri $1{,}53x10^{13}$ (W/m^3) olan ve multifilament yapıda gelişen lokalize çift CPD yoğunluk alanının olduğu görülmüştür. Ar/H_2 sisteminde 45 µm civarında tepe değeri $7{,}3x10^{16}$ (W/m^3) olan ve tek filament yapıda gelişen lokalize tek CPD yoğunluk alanının olduğu görülmüştür. H_2 karışımlı Ar sisteminde CPD parametresinin genlik değerinin arttığı ve daha lokalize geliştiği görülmüştür.

Şekil 3.32'de SİM-2 2D-$CPD_{sekans\text{-}son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için CPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.32. SİM-2 3D-$CPD_{sekans\text{-}son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar/H_2 sisteminde gelişen CPD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımının mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde gelişen CPD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımına kıyasla, daha kararlı, tek filament yapıda, daha lokalize ve yüksek genlikte geliştiği görülmektedir.

Çizelge 3.4'te SİM-2 simülasyon çalışmasında elde edilen parametre verileri özetlenmiştir.

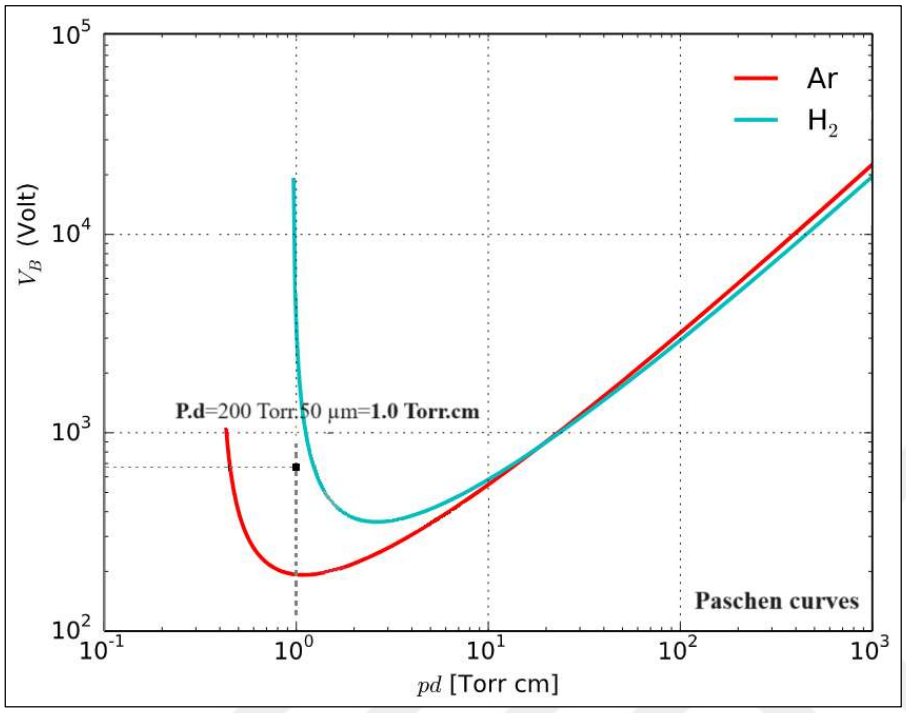
Çizelge 3.4. SİM-2 simülasyon çalışmasına ait sonuç verileri

	Gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma sistemi (GDSμP)		
Model ►	Temel Model	Modifiye Model	Modifiye/Karışım Model
Parametre ▼	ZnSe-Ar Basit düzlemsel katot	ZnSe-Ar Mikro-desenli düzlemsel katot	ZnSe-Ar/H_2 (3:2) Mikro-desenli düzlemsel katot
SS_o	Simülasyon sekans başlangıç (s):		
	$3{,}1623 \times 10^{-14}$	$3{,}1623 \times 10^{-14}$	$3{,}1623 \times 10^{-14}$
SS_s	Simülasyon sekans son (s):		
	$7{,}9433 \times 10^{-11}$	$1{,}4125 \times 10^{-10}$	$6{,}3096 \times 10^{-10}$
ED_0	Elektron yoğunluğu, sekans-başlangıç ($1/m^3$)		
	$1{,}00 \times 10^{17}$	$1{,}00 \times 10^{17}$	$1{,}00 \times 10^{17}$
ED_s	Elektron yoğunluğu, sekans-son ($1/m^3$)		
	$6{,}17 \times 10^{19}$	$1{,}13 \times 10^{20}$	$2{,}37 \times 10^{22}$
ECD_s	Elektron akım yoğunluğu, sekans-son (A/m^2)		
	$1{,}10 \times 10^{6}$	$5{,}19 \times 10^{6}$	$1{,}16 \times 10^{10}$
EPD_s	Elektrik potansiyel dağılımı, sekans-son (V)		
	335	448	742
CPD_s	Kapasitif güç depolama, sekans-son (W/m^3)		
	$1{,}75 \times 10^{12}$	$1{,}53 \times 10^{13}$	$7{,}30 \times 10^{16}$

Modifiye/karışım model ZnSe-Ar/H_2 (3:2) üzerinde yapılan sayısal simülasyon verileri 2-boyutlu ve 3-boyutlu grafik ortamlarda incelendiğinde, mikroplazma süreci sonunda ortaya çıkan elektron yoğunluğu, elektron akım yoğunluğu ve kapasitif güç depolama parametrelerinin reaktör boşluğundaki uzay-zamansal dağılımının Maxwell dağılım şekline daha yakın olduğu, şiddetlerinin daha lokalize ve yüksek olduğu görülmüştür.

Bir gaz ortamının elektriksel kırılım gerilimi (V_{BD}); gaz basıncı (P, Torr) ve anot-katot elektrotlar arası deşarj aralığı (d, cm) çarpımı P.d (Torr.cm) Paschen çarpımı ifadesi ile tanımlanmıştır.

Şekil 3.33'te SİM-2 hücre modelinde kullanılan argon/hidrojen plazma reaktörünün çalışma bölgesi Paschen eğrisi üzerinde P.d = 1,0 Torr.cm çarpımı ile gösterilmiştir.



Şekil 3.33. SİM-2 Ar/H_2-Paschen çalışma bölgesi (1,0 Torr.cm)

SİM-2 simülasyon sayısal analiz çalışmamız neticesinde; mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot elektrota sahip Ar/H_2 mikroplazma modülünün, mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot elektrota sahip Ar mikroplazma modülünden elektron yoğunluğu, elektron akım yoğunluğu ve kapasitif güç depolama parametreleri kıyaslandığında daha kararlı ve yüksek verimde çalışacağı sonucuna varılmıştır [72]. Tez çalışmamız kapsamında hedeflenen argon/hidrojen ikili gaz karışımının mikroplazma parametreleri üzerindeki pozitif katkısı SİM-2 sayısal simülasyon çalışması neticesinde anlaşılmıştır.

Müteakip simülasyon modelimiz SİM-3'te, mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot elektrota sahip Ar ve farklı hidrojen oranında tanımlanan Ar/H_2 ikili gaz karışım reaktör ortamının mikroplazma deşarj parametreleri (ED, ECD, EPD, CPD) üzerindeki uzay-zamansal etkisi analiz edilmiştir.

3.2.3. Simülasyon analiz çalışması (SİM-3)

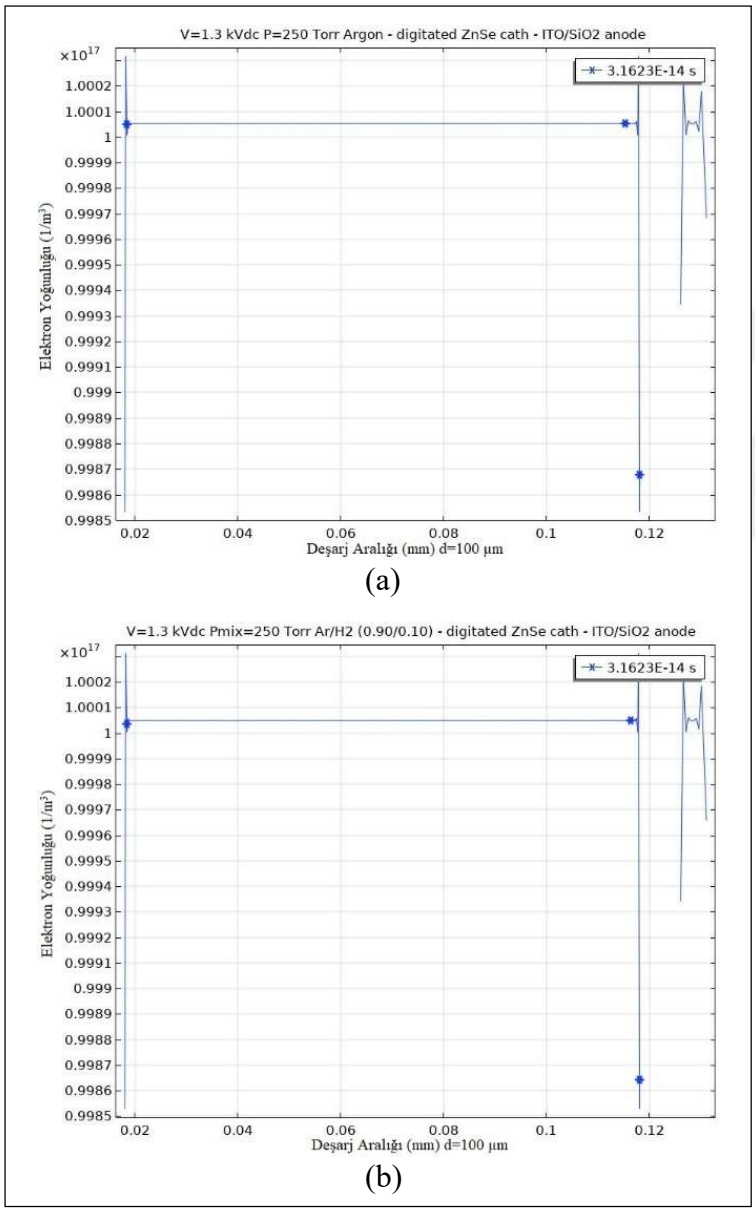
İki boyutlu düzlemsel kare geometriye sahip doğru akım (DC) beslemeli gaz boşalma-yarıiletken (ZnSe) mikroplazma sisteminin (GDSμPS) mikro ölçekli modeli FEM çözücü COMSOL Multifizik DC plazma simülasyon programını kullanarak elektron yoğunluğu (ED), elektron akım yoğunluğu (ECD), elektrik potansiyel dağılımı (EPD) ve kapasitif güç depolama (CPD) temel boşalma parametreleri sayısal olarak analiz edildi. Mikroplazma reaksiyon sürecinin uzay-zamansal dinamik davranışı grafik ortamda kapsamlı bir şekilde incelendi. Çizelge 3.5'te SİM-3 simülasyon çalışmasına ait parametre tanımları verilmiştir.

Çizelge 3.5. SİM-3 simülasyon çalışmasına ait parametre tanımları

Parametre	Tanım	
Simülasyon Çalışması Kodu	SİM-3	
GDSμPS (gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma sistemi)	ZnSe-Ar	ZnSe-Ar/H_2
Simülasyon Modelleri	Modifiye model	Modifiye/Karışım model
Hücre yapısı	İki-boyutlu kare geometrili düzlemsel reaktör	
Hücre besleme gerilimi	V = 1,3 kVDC	
Plazma proses gaz tipi ve karışım oranı	Argon (Ar)	Argon/hidrojen karışımı Ar/H_2 (%10)
Plazma proses gaz basıncı	P = 250 Torr	
Elektrotlar arası mesafe (anot-katot)	d = 100 μm	
Fotokatot elektrot malzemesi	Çinko selenit (ZnSe) yarıiletken (Adachi ve Taguchi, 1991)	
Fotokatot elektrot elektriksel kontak malzemesi	Altın (Au) ince-film (Johnson ve Christy 1972: n, k 0.188-1.937 μm)	
Fotokatot elektron emisyon yüzeyi	Mikro-desenli düzlemsel 1,0 μm 1,0 μm 1,0 μm periyodik kare morfoloji	
Fotokatot elektrot çapı	r = 50 μm	
Anot elektrot malzemesi	Silika (SiO_2) (Malitson 1965: Fused silica; n 0.21-6.7 μm)	
Anot elektrot elektriksel kontak malzemesi	İndiyum kalay oksit (ITO) ince-film (Moerland ve Hoogenboom 2016: n,k 0.4-1.0 μm)	
Gaz ortamdaki başlangıç (tohum) elektron yoğunluğu	$n_{e,o} = 1{,}0x10^{17}$ (1/m^3)	
Paschen çarpımı	P.d = 250 Torr.100 μm = 2,5 Torr.cm	
Hücre çalışma ortam sıcaklığı	T = 300 K	

Elektron yoğunluğu (ED)

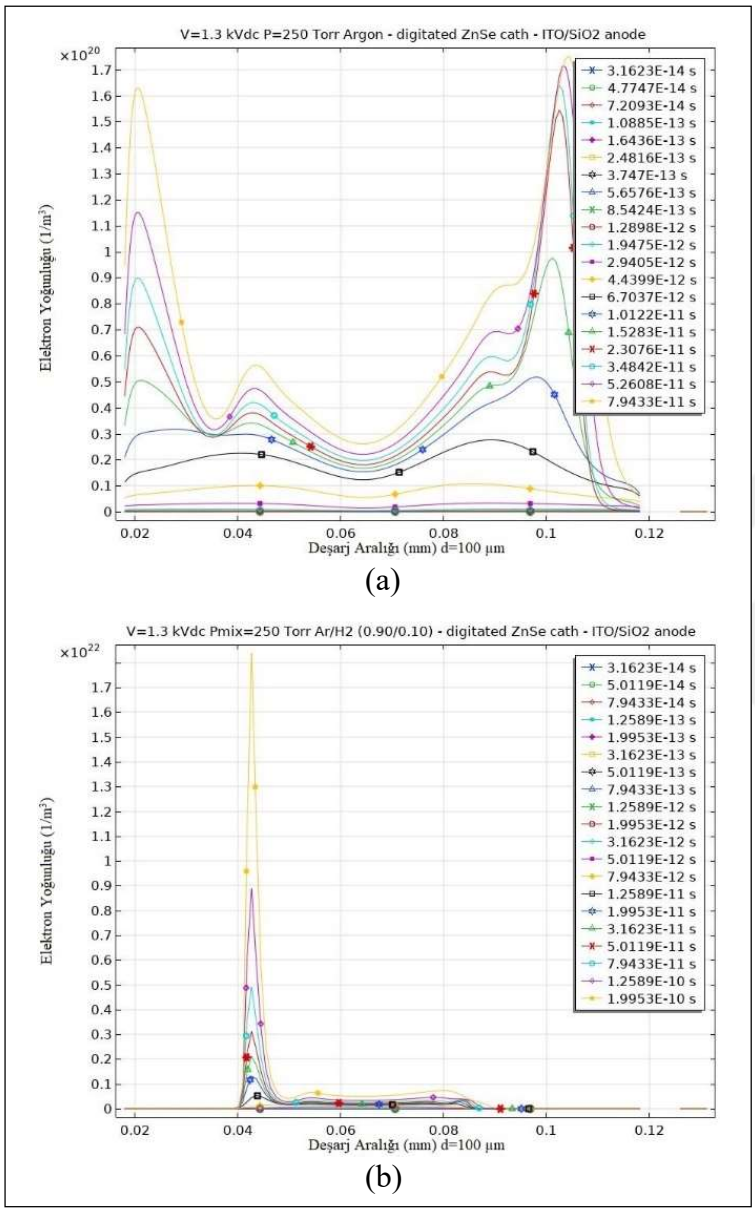
Şekil 3.34'te SİM-3 1D-$ED_{sekans\text{-}başlangıç}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ED grafikleri verilmiştir. Reaktör gaz ortamdaki başlangıç elektron yoğunluk değeri hesaplamalarda $1{,}0x10^{17}$ ($1/m^3$) alınmıştır.



Şekil 3.34. SİM-3 1D-$ED_{sekans\text{-}başlangıç}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Başlangıçta (t_0=$3{,}1623x10^{-14}$ s) arka plan iyonizasyon reaksiyonları devam etmesine rağmen, Townsend (TA) iyonizasyon reaksiyon süreci henüz başlamadığından ve gaz ortamın elektriksel kırılımı (V_{BD}) gerçekleşmediğinden dolayı ED parametresi, reaktör odacığında kararsız ve ortalama bir dağılım göstermektedir.

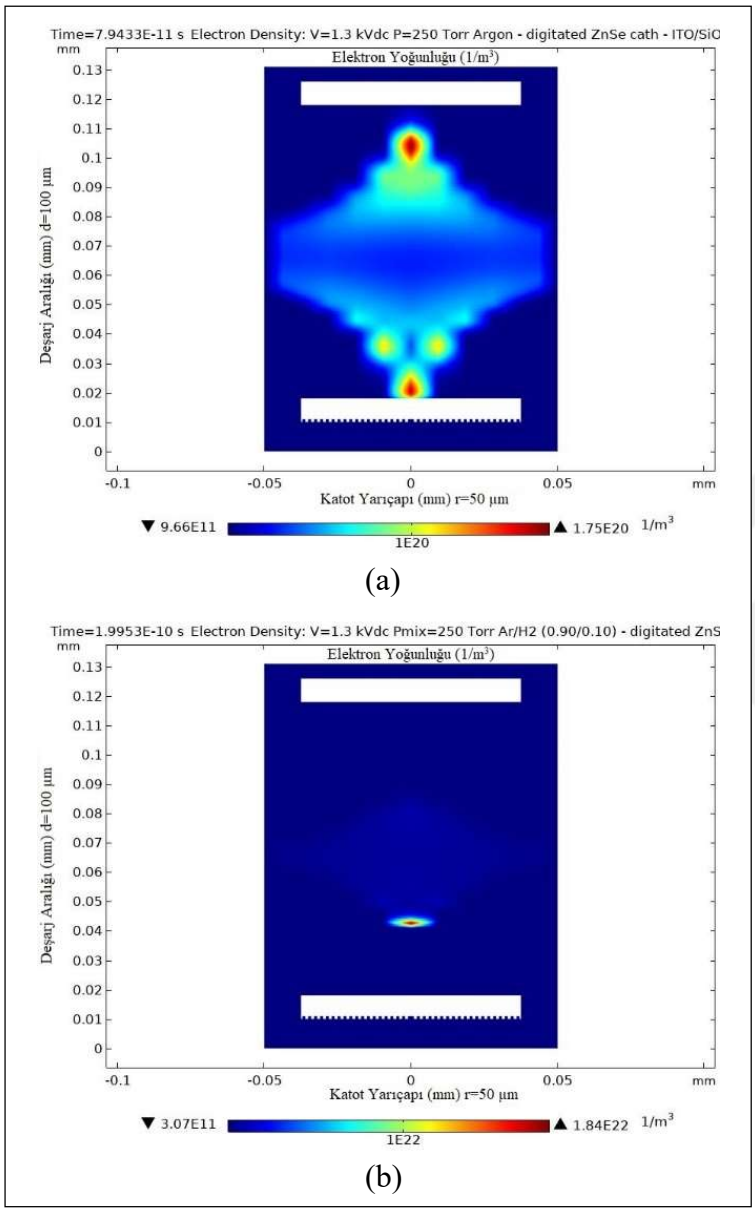
Şekil 3.35'te SİM-3 1D-ED_{sekans} mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ED grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.35. SİM-3 1D-ED_{sekans} mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Karşılaştırmalı modellerin mikroplazma reaksiyon sekansları, simülasyon zaman cetvelinde sırasıyla, mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde 7,9433x10^{-11} s ve Ar/H_2 (90:10) sisteminde 1,9953x10^{-10} s zaman diliminde tamamlanmıştır. ED parametresi, farklı tipteki gaz sistemlerinin (Ar, Ar/H_2) aynı elektron emisyon yüzey morfolojisine sahip katot modellerinde (mikro-desenli) karakteristik uzay-zamansal davranış sergilemiştir. ED parametresinin, Ar/H_2 sisteminde Maxwell dağılım fonksiyonu davranışını takip ettiği görülmüştür.

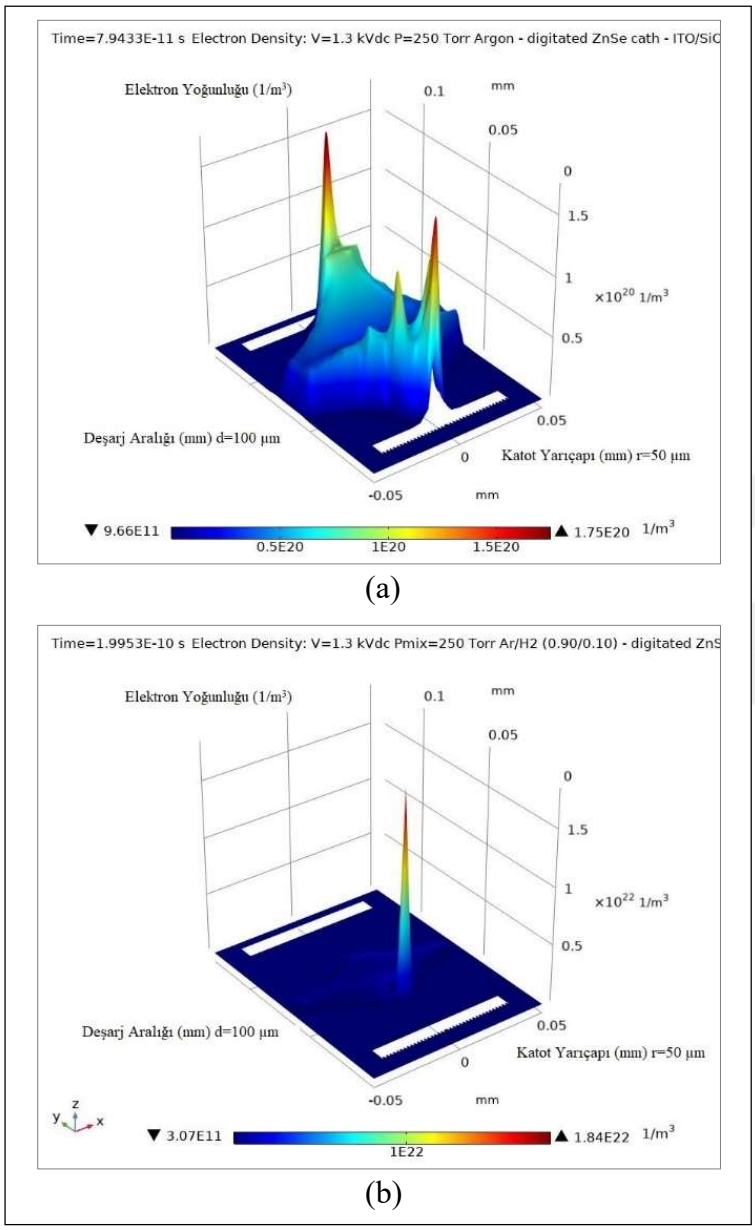
Şekil 3.36'da SİM-3 2D-$ED_{sekans\text{-}son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ED grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.36. SİM-3 2D-$ED_{sekans\text{-}son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

ED tepe noktası değerleri, sırasıyla, mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $1{,}75x10^{20}$ ($1/m^3$), Ar/H_2 (90:10) sisteminde $1{,}84x10^{22}$ ($1/m^3$) elde edilmiştir. Ar/H_2 ikili gaz karışım modelinde ED parametresinin genlik olarak yükseldiği ve uzay-zamansal dağılımının reaktör hücre içinde lokal ve katota yakın dar bir alanda toplandığı görülmüştür.

Şekil 3.37'de SİM-3 3D-$ED_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ED grafikleri verilmiştir.

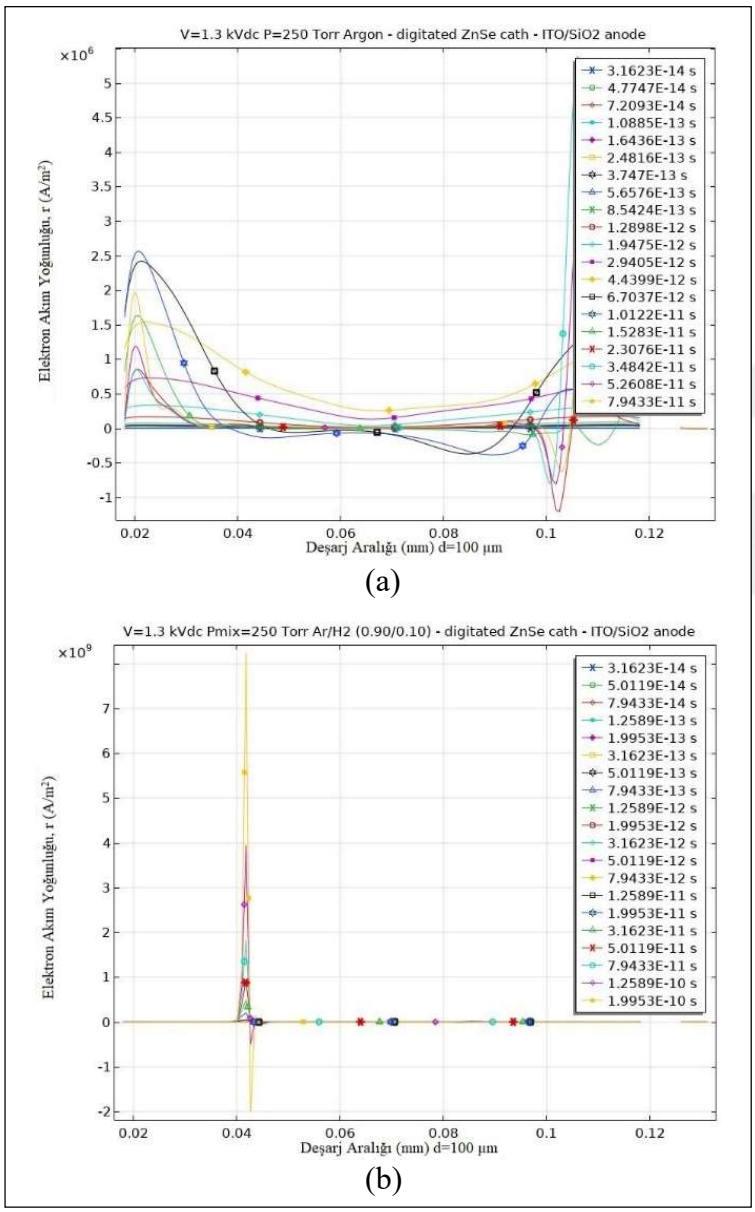


Şekil 3.37. SİM-3 3D-$ED_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

ED parametresi, Ar sisteminde 10 µm-90 µm arasında geniş bir alanda multifilament yapıda dağılım gösterirken, Ar/H_2 (90:10) sisteminde 40 µm-45 µm arasında dar bir alanda konsantrik ve lokalize tek filament yapıda gelişmiştir.

Elektron akım yoğunluğu (ECD)

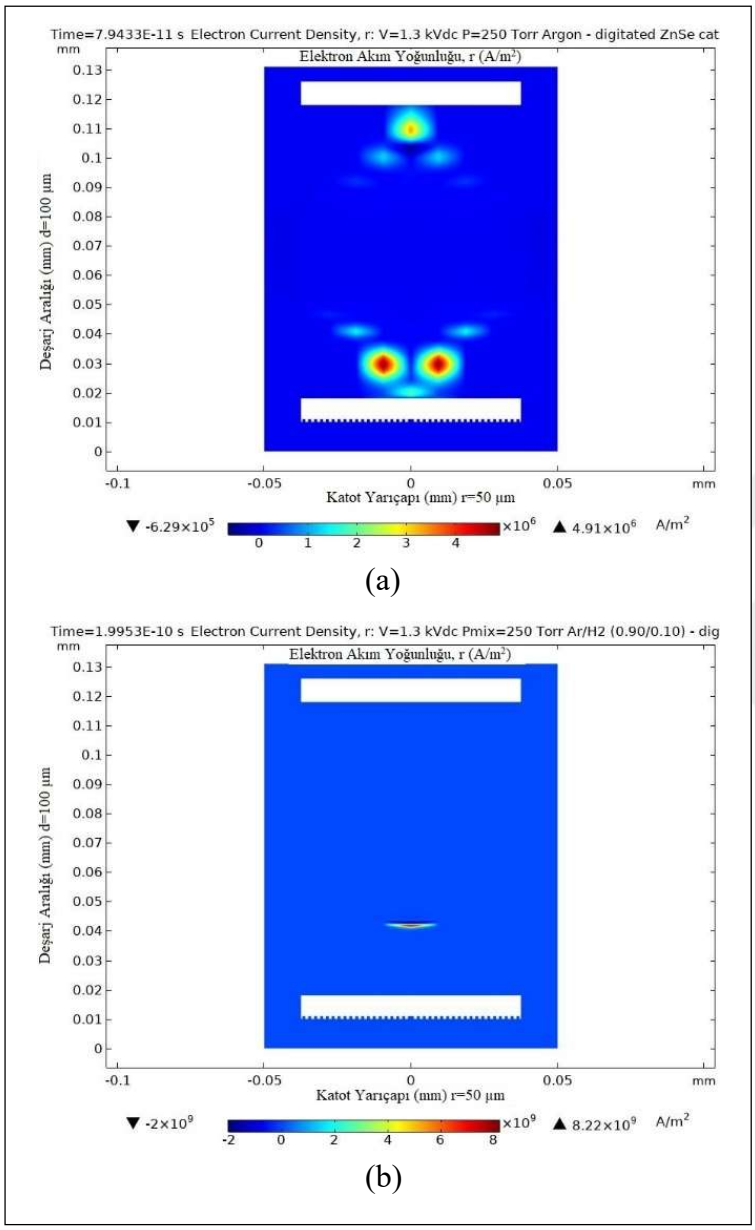
Şekil 3.38'de SİM-3 1D-ECD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ECD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.38. SİM-3 1D-ECD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $7{,}9433 \times 10^{-11}$ s ve Ar/H_2 sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}9953 \times 10^{-10}$ s aralığında gerçekleşen mikro deşarj reaksiyon sekanslarına ait ECD parametresinin deşarj aralığı (d = 100 µm) boyunca değişim grafikleri verilmiştir. Ar/H_2 sisteminin sekans periyodunun daha uzun olduğu görülmüştür.

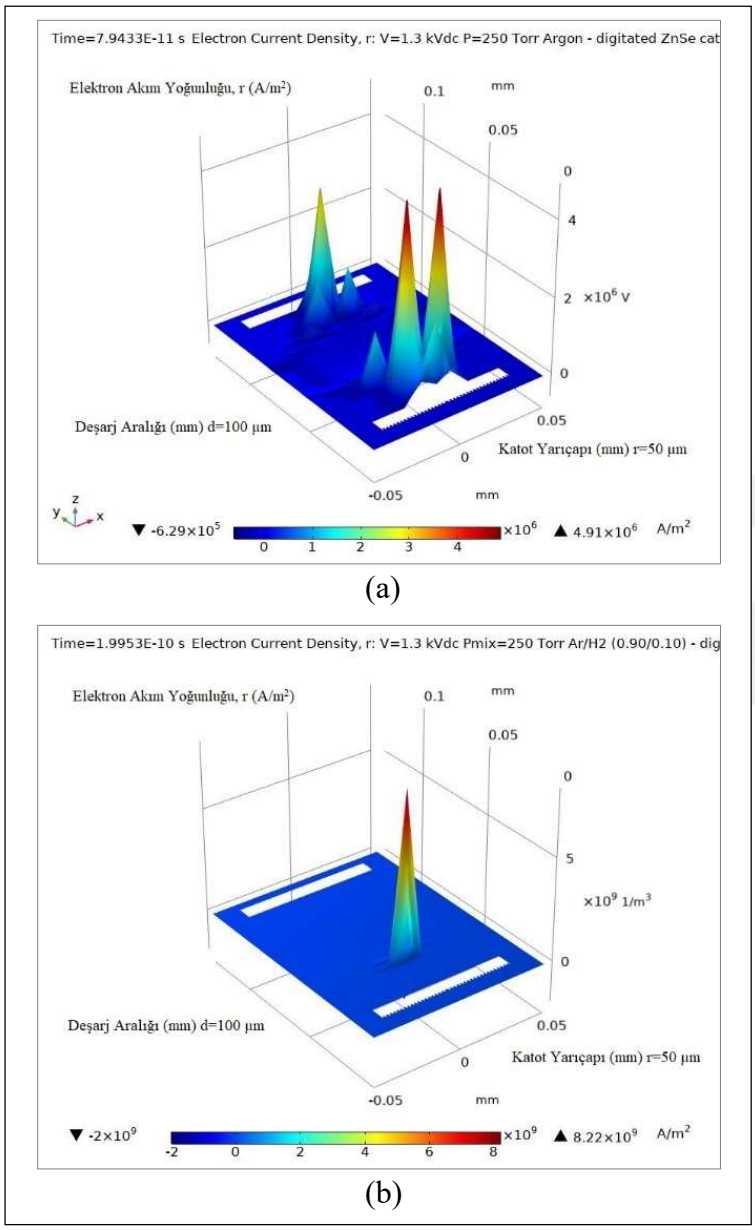
Şekil 3.39'da SİM-3 2D-ECD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ECD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.39. SİM-3 2D-ECD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

ECD tepe noktası değerleri, sırasıyla, mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde 4,91x10^6 (A/m^2), mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar/H_2 (90:10) sisteminde 8,22x10^9 (A/m^2) elde edilmiştir. Mikro-desenli düzlemsel katot Ar/H_2 gaz karışımlı gaz boşalma sisteminde ECD parametresinin genlik olarak yükseldiği ve uzay-zamansal dağılımının daha lokalize ve konsantrik tek filament formunda geliştiği görülmüştür.

Şekil 3.40'ta SİM-3 3D-$ECD_{sekans\text{-}son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ECD grafikleri verilmiştir.

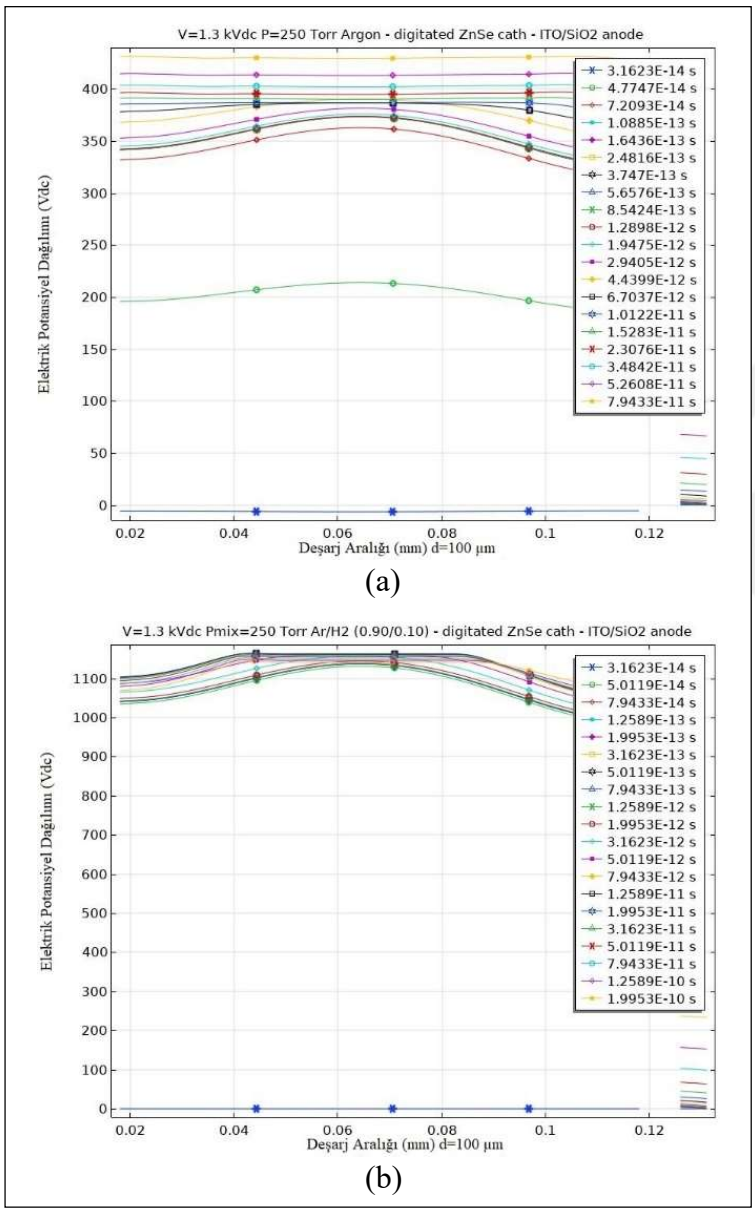


Şekil 3.40. SİM-3 3D-$ECD_{sekans\text{-}son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde ECD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımının çift filament formda geliştiği, Ar/H_2 (90:10) sisteminde ECD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımının tek filament yapıda konsantrik ve lokalize geliştiği görülmüştür.

Elektrik potansiyel dağılımı (EPD)

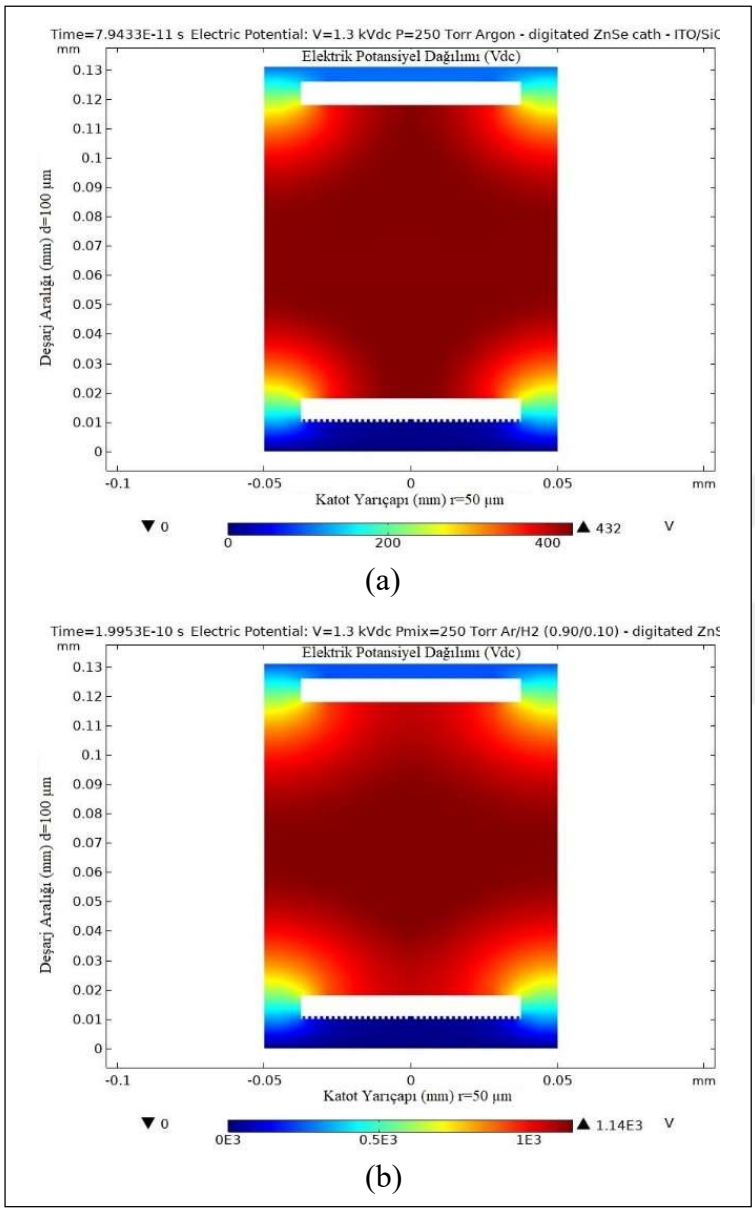
Şekil 3.41'de SİM-3 1D-EPD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için EPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.41. SİM-3 1D-EPD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $7{,}9433 \times 10^{-11}$ s ve Ar/H_2 sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}9953 \times 10^{-10}$ s aralığında gerçekleşen mikro boşalma reaksiyon sekanslarına ait EPD parametresinin deşarj aralığı (d = 100 µm) boyunca değişim grafikleri verilmiştir.

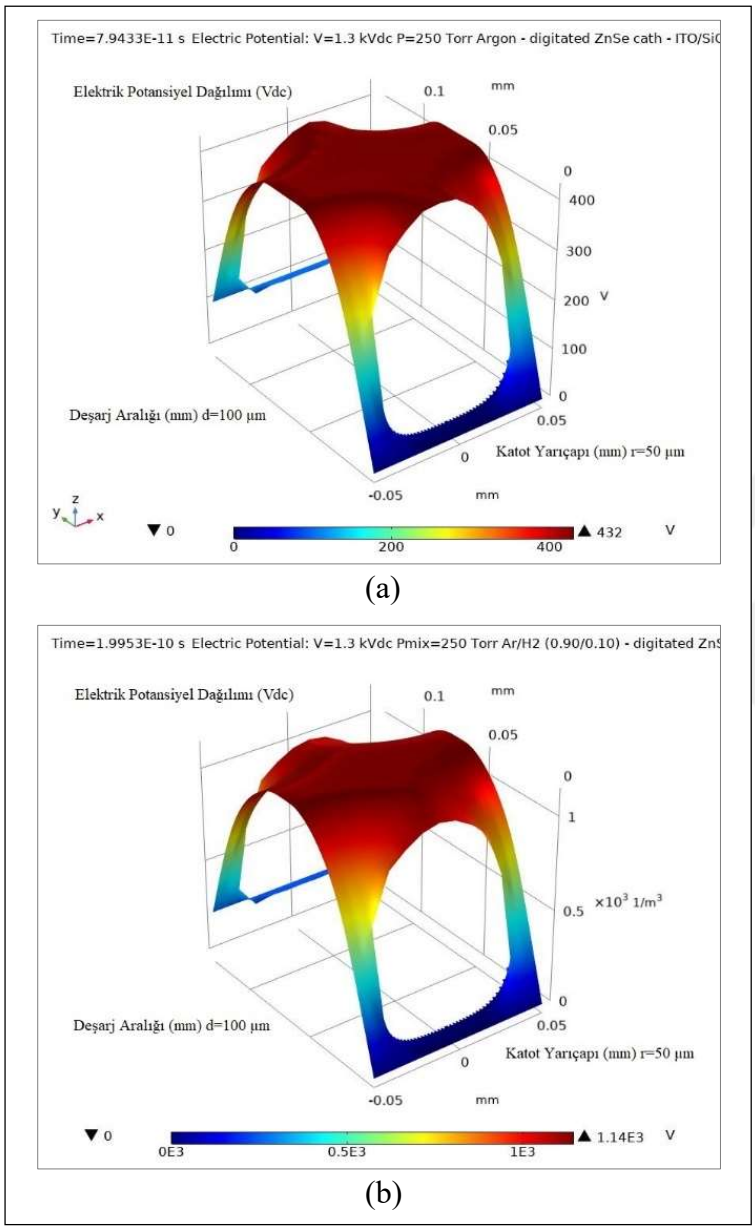
Şekil 3.42'de SİM-3 2D-EPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için EPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.42. SİM-3 2D-EPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro boşalma reaksiyon sekansının son zaman diliminde EPD parametresi, mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde 432 V (t_s = 7,9433x10^{-11} s) ve Ar/H_2 sisteminde 1140 V (t_s = 1,9953x10^{-10} s) olduğu görülmüştür. Ar/H_2 sisteminde oluşan EPD değerinin Ar sisteminden çok daha yüksek gerçekleştiği (yaklaşık üç katı seviyesinde) görülmüştür.

Şekil 3.43'te SİM-3 3D-EPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için EPD grafikleri verilmiştir.

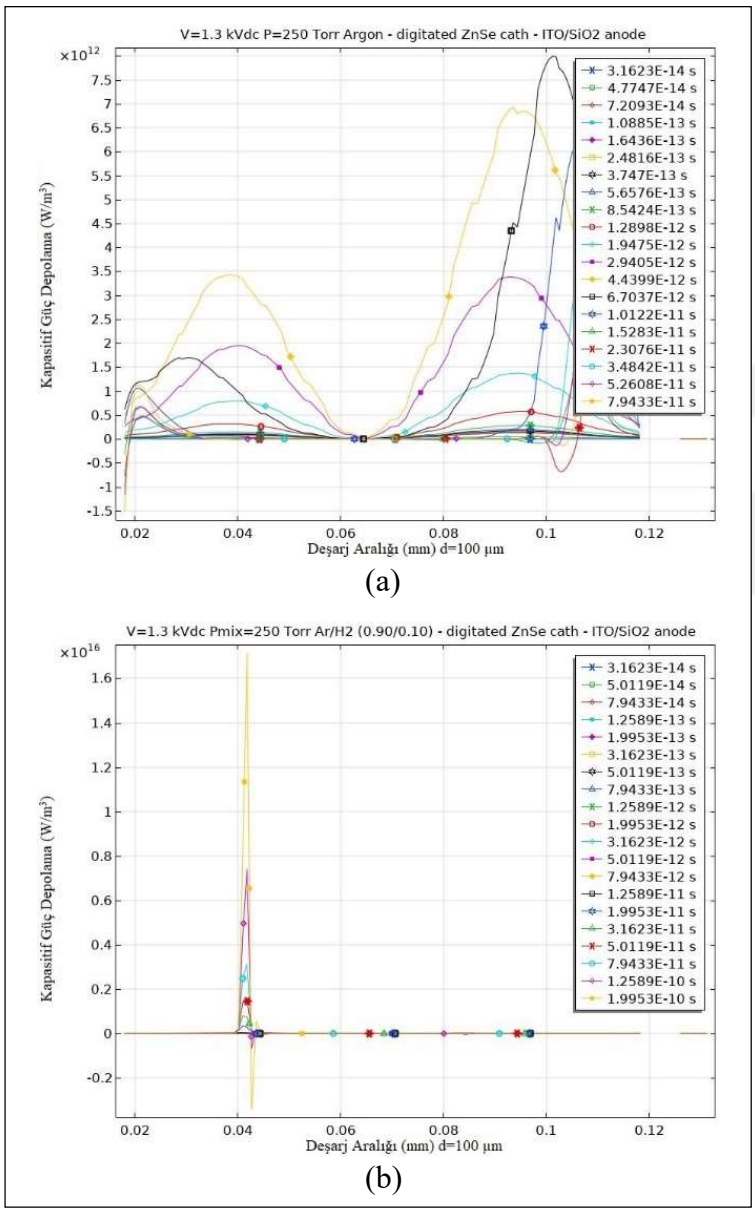


Şekil 3.43. SİM-3 3D-EPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro deşarj reaksiyon sekansının son zaman diliminde EPD parametresinin boşalma aralığı (d = 100 µm) ve katot yarıçapı (r = 50 µm) eksenlerine göre değişim grafikleri verilmiştir. Mikroplazmanın uzay-zamansal hızlı ve karmaşık değişimi, hücre boyunca EPD parametresinin homojenliğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu dağılım sabit tutulmazsa, katot ve anot elektrotları arasında farklı glow deşarj alanları oluşmaktadır.

Kapasitif güç depolama (CPD)

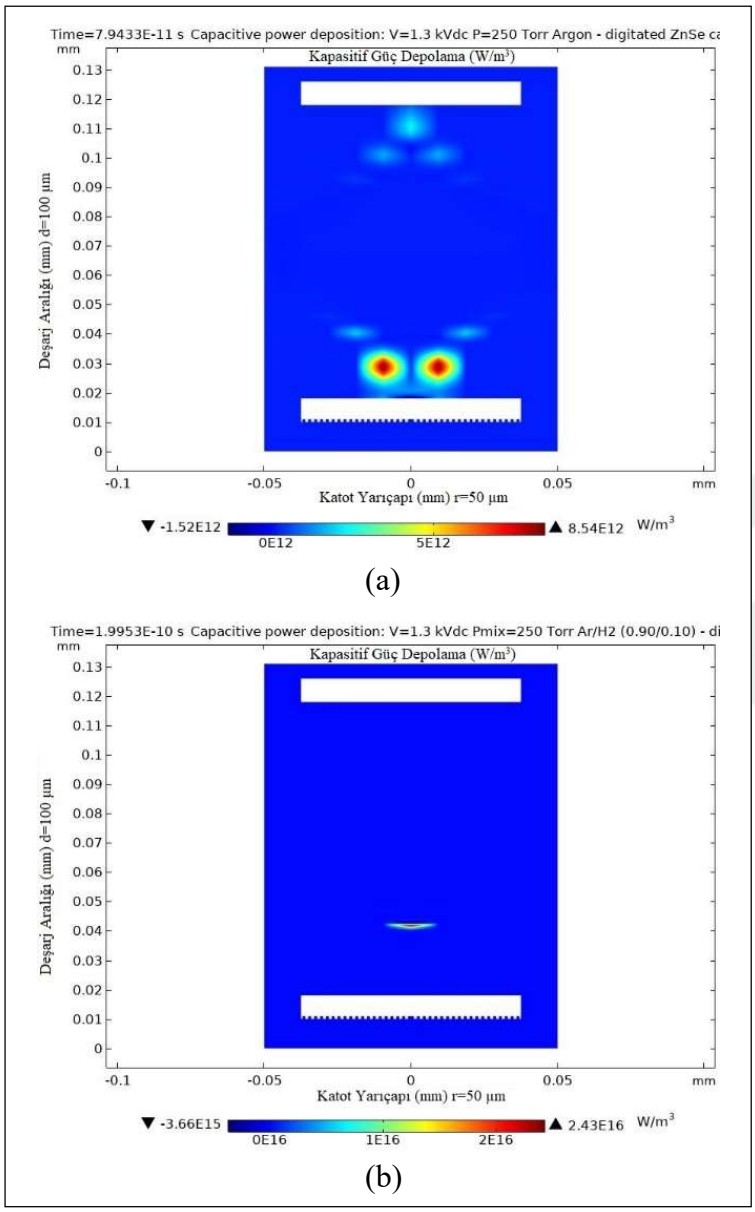
Şekil 3.44'te SİM-3 1D-CPD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için CPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.44. SİM-3 1D-CPD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $7{,}9433 \times 10^{-11}$ s ve Ar/H_2 sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}9953 \times 10^{-10}$ s aralığında gerçekleşen mikro deşarj reaksiyon sekanslarına ait CPD parametresinin boşalma aralığı (d = 100 µm) boyunca değişim grafikleri verilmiştir.

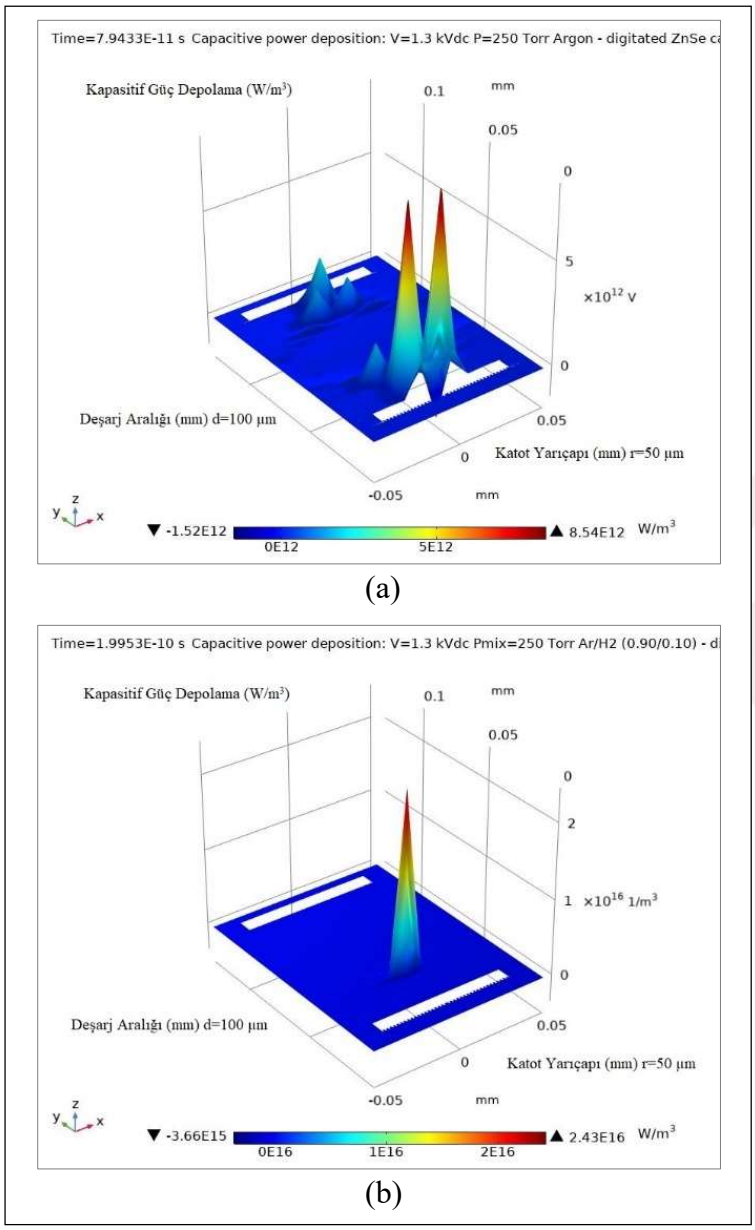
Şekil 3.45'te SİM-3 2D-CPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için CPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.45. SİM-3 2D-CPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Ar sisteminde 30 µm civarında tepe değeri 8,54x10^{12} (W/m^3) olan lokalize çift CPD yoğunluk alanının olduğu görülmüştür. Ar/H_2 sisteminde 45 µm civarında tepe değeri 2,43x10^{16} (W/m^3) olan lokalize tek CPD yoğunluk alanının olduğu görülmüştür. H_2 karışımlı Ar sisteminde CPD parametresinin genlik değerinin arttığı ve daha lokalize geliştiği görülmüştür.

Şekil 3.46'da SİM-3 3D-CPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için CPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.46. SİM-3 3D-CPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar/H_2 sisteminde gelişen CPD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımının mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot Ar sisteminde gelişen CPD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımına kıyasla, daha kararlı, tek filament yapıda, daha lokalize geliştiği görülmektedir. Mikroplazmanın termodinamik kararsız doğası, reaktörde elektriksel kırılım meydana gelmeden önce önemli miktarda güç kaybına neden olmaktadır.

Çizelge 3.6'da SİM-3 simülasyon çalışmasında elde edilen parametre verileri özetlenmiştir.

Çizelge 3.6. SİM-3 simülasyon çalışmasına ait sonuç verileri

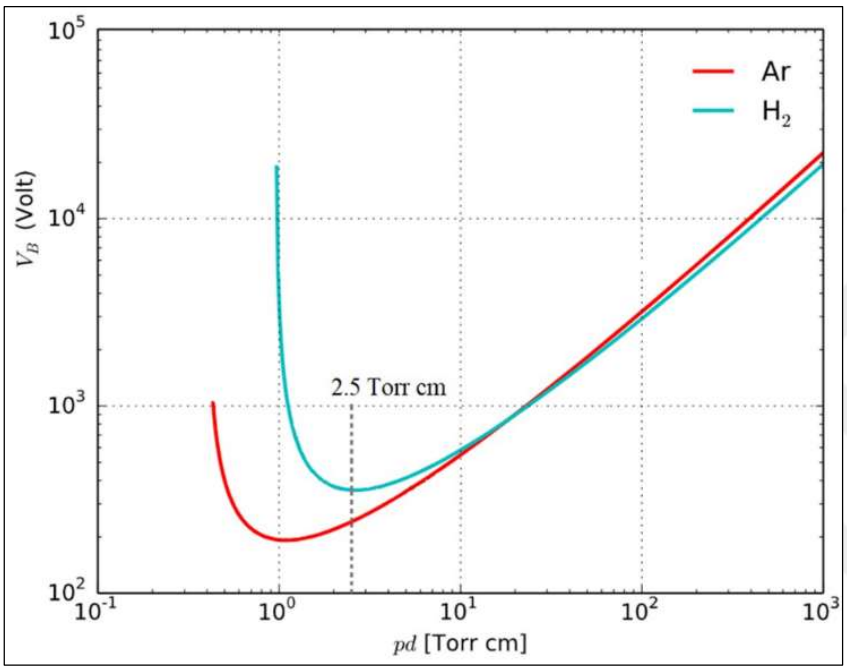
	Gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma sistemi (GDSμP)	
Model ►	Modifiye Model	Modifiye/Karışım Model
Parametre ▼	ZnSe-Ar Mikro-desenli düzlemsel katot	ZnSe-Ar/H_2 Mikro-desenli düzlemsel katot
SS_o	Simülasyon sekans başlangıç (s):	
	$3{,}1623x10^{-14}$	$3{,}1623x10^{-14}$
SS_s	Simülasyon sekans son (s):	
	$7{,}9433x10^{-11}$	$1{,}9953x10^{-10}$
ED_0	Elektron yoğunluğu, sekans-başlangıç ($1/m^3$):	
	$1{,}00x10^{17}$	$1{,}00x10^{17}$
ED_s	Elektron yoğunluğu, sekans-son ($1/m^3$):	
	$1{,}87x10^{20}$	$1{,}84x10^{22}$
ECD_s	Elektron akım yoğunluğu, sekans-son (A/m^2):	
	$5{,}15x10^{6}$	$8{,}22x10^{9}$
EPD_s	Elektrik potansiyel dağılımı, sekans-son (V):	
	425	1140
CPD_s	Kapasitif güç depolama, sekans-son (W/m^3):	
	$8{,}54x10^{12}$	$2{,}43x10^{16}$

Çizelge 3.6. simülasyon sonuç verilerine göre;

1) ZnSe-Ar/H_2 mikroplazma sistemindeki elektron yoğunluğu (ED_s) değeri genlik olarak, ZnSe-Ar mikroplazma sisteminden yaklaşık 100 kat yüksektir.
2) ZnSe-Ar/H_2 mikroplazma sistemindeki elektron akım yoğunluğu (ECD_s) değeri genlik olarak, ZnSe-Ar mikroplazma sisteminden yaklaşık 1600 kat yüksektir.
3) ZnSe-Ar/H_2 mikroplazma sistemindeki elektrik potansiyel dağılım (EPD_s) değeri genlik olarak, ZnSe-Ar mikroplazma sisteminden yaklaşık 715 VDC daha yüksektir.
4) ZnSe-Ar/H_2 mikroplazma sistemindeki kapasitif güç depolama (CPD_s) değeri genlik olarak, ZnSe-Ar mikroplazma sisteminden yaklaşık 2845 kat yüksektir.

Bir gaz ortamının elektriksel kırılım gerilimi (V_{BD}); gaz basıncı (P, Torr) ve anot-katot elektrotlar arası deşarj aralığı (d, cm) çarpımı P.d (Torr.cm) Paschen çarpımı ifadesi ile tanımlanmıştır.

Şekil 3.47'de SİM-3 hücre modelinde kullanılan argon/hidrojen plazma reaktörünün çalışma bölgesi Paschen eğrisi üzerinde P.d = 2,5 Torr.cm çarpımı ile gösterilmiştir.



Şekil 3.47. SİM-3 Ar/H_2-Paschen çalışma bölgesi (2,5 Torr.cm)

SİM-3 simülasyon sayısal analiz çalışmamız neticesinde; mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot elektrota sahip Ar/H_2 sistemi, mikro-desenli düzlemsel ZnSe katot elektrota sahip Ar sisteminden elektron yoğunluğu (ED), elektron akım yoğunluğu (ECD) ve kapasitif güç depolama (CPD) parametreleri kıyaslandığında; GDSμP sisteminin daha kararlı ve performanslı çalışacağı sonucuna varılmıştır. Tez çalışmamız kapsamında hedeflenen Ar/H_2 ikili gaz karışımının mikroplazma parametreleri üzerindeki pozitif katkısı SİM-3 sayısal simülasyon çalışması neticesinde farklı H_2 oranındaki Ar/H_2 ikili gaz karışımlı reaktör hücre modelinde rapor edilmiştir [73].

Müteakip simülasyon modelimiz SİM-4'te, mikro-desenli düzlemsel alüminyum galyum antimonid (AlGaSb) katot elektrota sahip Ar ve Ar/H_2 ikili gaz karışım reaktör ortamının mikroplazma deşarj parametreleri (ED, ECD, EPD, CPD) üzerindeki uzay-zamansal etkisi analiz edilmiştir.

3.2.4. Simülasyon analiz çalışması (SİM-4)

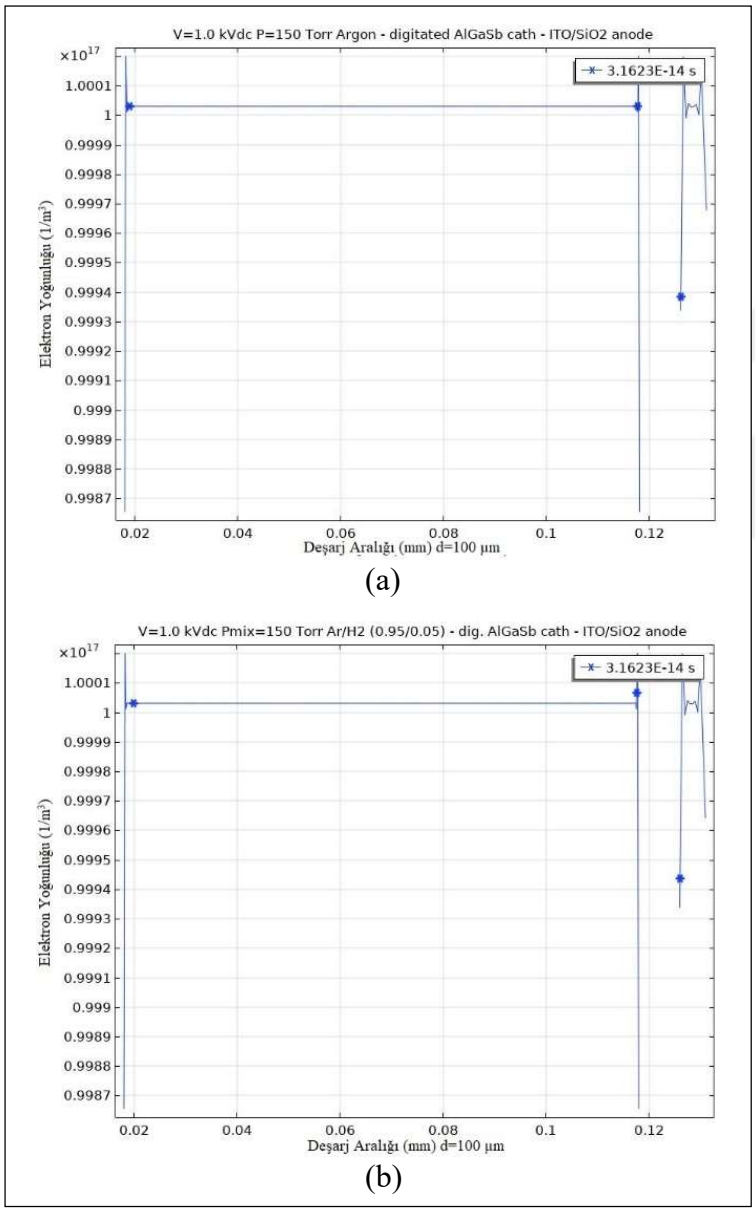
İki boyutlu düzlemsel kare geometriye sahip doğru akım (DC) beslemeli gaz deşarj-yarıiletken (AlGaSb) mikroplazma sisteminin (GDSμPS) mikro ölçekli modeli FEM çözücü COMSOL Multifizik DC plazma simülasyon programını kullanarak elektron yoğunluğu (ED), elektron akım yoğunluğu (ECD), elektrik potansiyel dağılımı (EPD) ve kapasitif güç depolama (CPD) temel deşarj parametreleri sayısal olarak analiz edildi. Mikroplazma reaksiyon sürecinin uzay-zamansal dinamik davranışı grafik ortamda kapsamlı bir şekilde incelendi. Çizelge 3.7'de SİM-4 simülasyon çalışmasına ait parametre tanımları verilmiştir.

Çizelge 3.7. SİM-4 simülasyon çalışmasına ait parametre tanımları

Parametre	Tanım	
Simülasyon Çalışması Kodu	SİM-4	
GDSμPS (gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma sistemi)	AlGaSb-Ar	AlGaSb -Ar/H_2
Simülasyon Modelleri	Modifiye model	Modifiye/Karışım model
Hücre yapısı	İki-boyutlu kare geometrili düzlemsel reaktör	
Hücre besleme gerilimi	V = 1,0 kVDC	
Plazma proses gaz tipi ve karışım oranı	Argon (Ar)	Argon/hidrojen karışımı Ar/H_2 (%5)
Plazma proses gaz basıncı	P = 150 Torr	
Elektrotlar arası mesafe (anot-katot)	d = 100 μm	
Fotokatot elektrot malzemesi	Aluminyum galyum antimonid (AlGaSb) (Ferrini et al. 1998: n,k 0.207-2.480 μm; 10% Al)	
Fotokatot elektrot elektriksel kontak malzemesi	Altın (Au) ince-film (Johnson ve Christy 1972: n, k 0.188-1.937 μm)	
Fotokatot elektron emisyon yüzeyi	Mikro-desenli düzlemsel 1,0 μm 1,0 μm 1,0 μm periyodik kare morfoloji	
Fotokatot elektrot çapı	r = 50 μm	
Anot elektrot malzemesi	Silika (SiO_2) (Malitson 1965: Fused silica; n 0.21-6.7 μm)	
Anot elektrot elektriksel kontak malzemesi	İndiyum kalay oksit (ITO) ince-film (Moerland ve Hoogenboom 2016: n,k 0.4-1.0 μm)	
Gaz ortamdaki başlangıç (tohum) elektron yoğunluğu	$n_{e,o} = 1{,}0x10^{17}$ $(1/m^3)$	
Paschen çarpımı	P.d = 150 Torr.100 μm = 1,5 Torr.cm	
Hücre çalışma ortam sıcaklığı	T = 300 K	

Elektron yoğunluğu (ED)

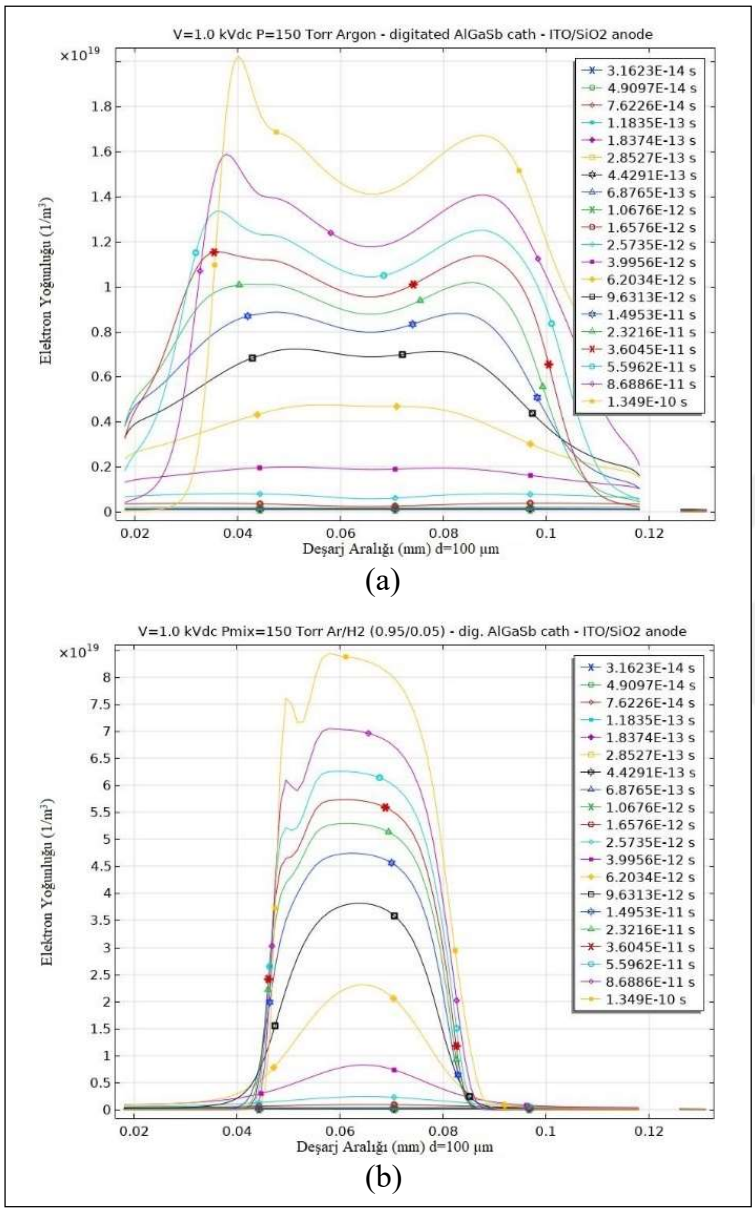
Şekil 3.48'de SİM-4 1D-$ED_{sekans\text{-}başlangıç}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için ED grafikleri verilmiştir. Reaktör gaz ortamdaki başlangıç elektron yoğunluk değeri $1{,}0x10^{17}$ ($1/m^3$) alınmıştır.



Şekil 3.48. SİM-4 1D-$ED_{sekans\text{-}başl}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Başlangıçta (t_0=3,1623x10^{-14} s) arka plan iyonizasyon reaksiyonları devam etmesine rağmen, Townsend (TA) iyonizasyon reaksiyon süreci henüz başlamadığından ve gaz ortamın elektriksel kırılımı (V_{BD}) gerçekleşmediğinden dolayı ED parametresi, reaktör odacığında kararsız ve ortalama bir dağılım göstermektedir.

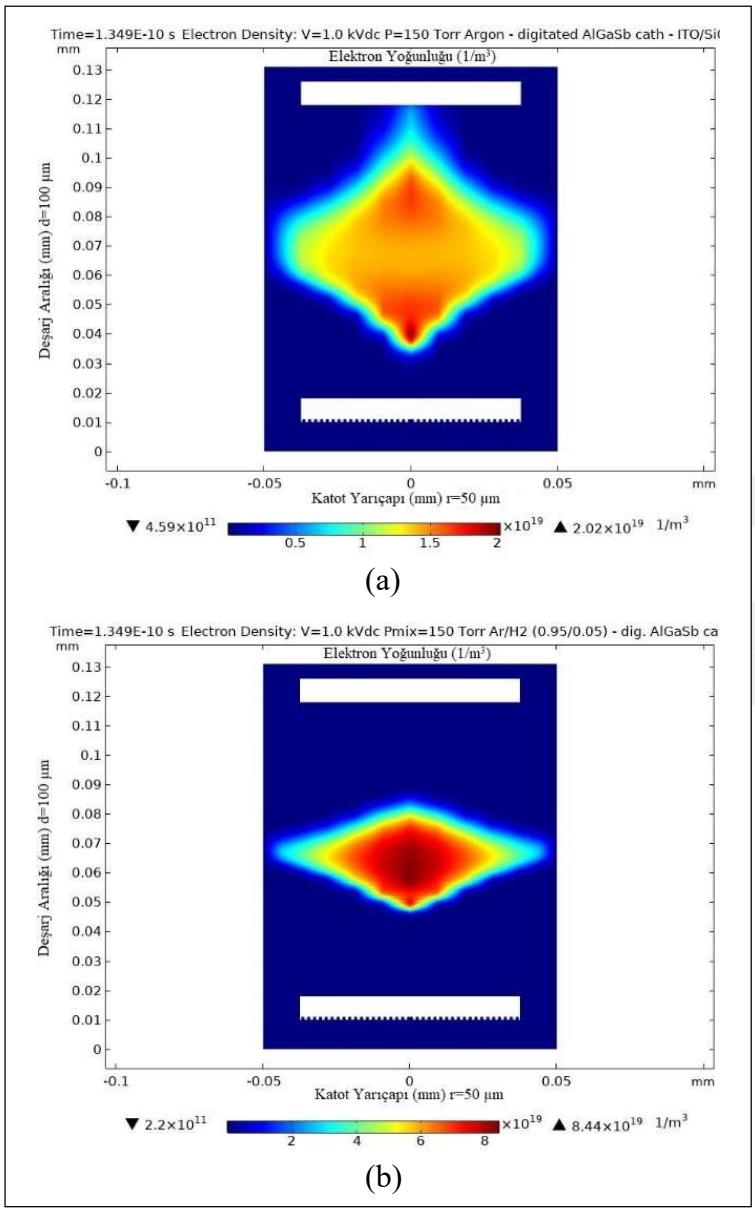
Şekil 3.49'da SİM-4 1D-ED_{sekans} mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ED grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.49. SİM-4 1D-ED_{sekans} mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Karşılaştırmalı modellerin mikroplazma reaksiyon sekansları, simülasyon zaman cetvelinde sırasıyla, mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot Ar sisteminde 1,349x10^{-10} s ve Ar/H_2 (95:05) sisteminde 1,349x10^{-10} s zaman diliminde tamamlanmıştır. ED parametresi, farklı tipteki gaz sistemlerinin (Ar, Ar/H_2) aynı elektron emisyon yüzey morfolojisine sahip katot modellerinde (mikro-desenli) karakteristik uzay-zamansal davranış sergilemiştir.

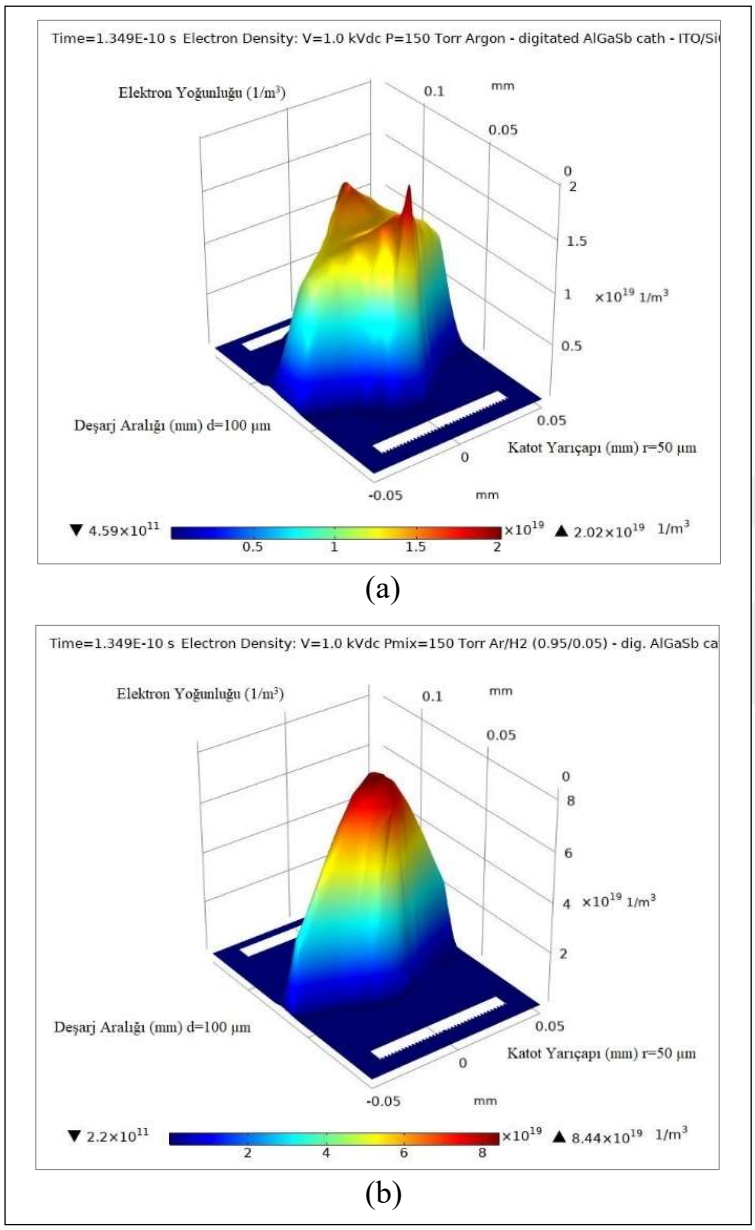
Şekil 3.50'de SİM-4 2D-$ED_{sekans\text{-}son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 gaz boşalma modelleri için ED grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.50. SİM-4 2D-$ED_{sekans\text{-}son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2

ED tepe noktası değerleri, sırasıyla, mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot Ar sisteminde 2,02x10^{19} (1/m^3) ve Ar/H_2 (95:05) sisteminde 8,44x10^{19} (1/m^3) elde edilmiştir. Ar/H_2 ikili gaz karışım modelinde ED parametresinin genlik olarak yükseldiği ve uzay-zamansal dağılımının reaktör hücre içinde lokal ve merkezi geniş bir alanda toplandığı görülmüştür.

Şekil 3.51'de SİM-4 3D-ED$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 gaz boşalma modelleri için ED grafikleri verilmiştir.

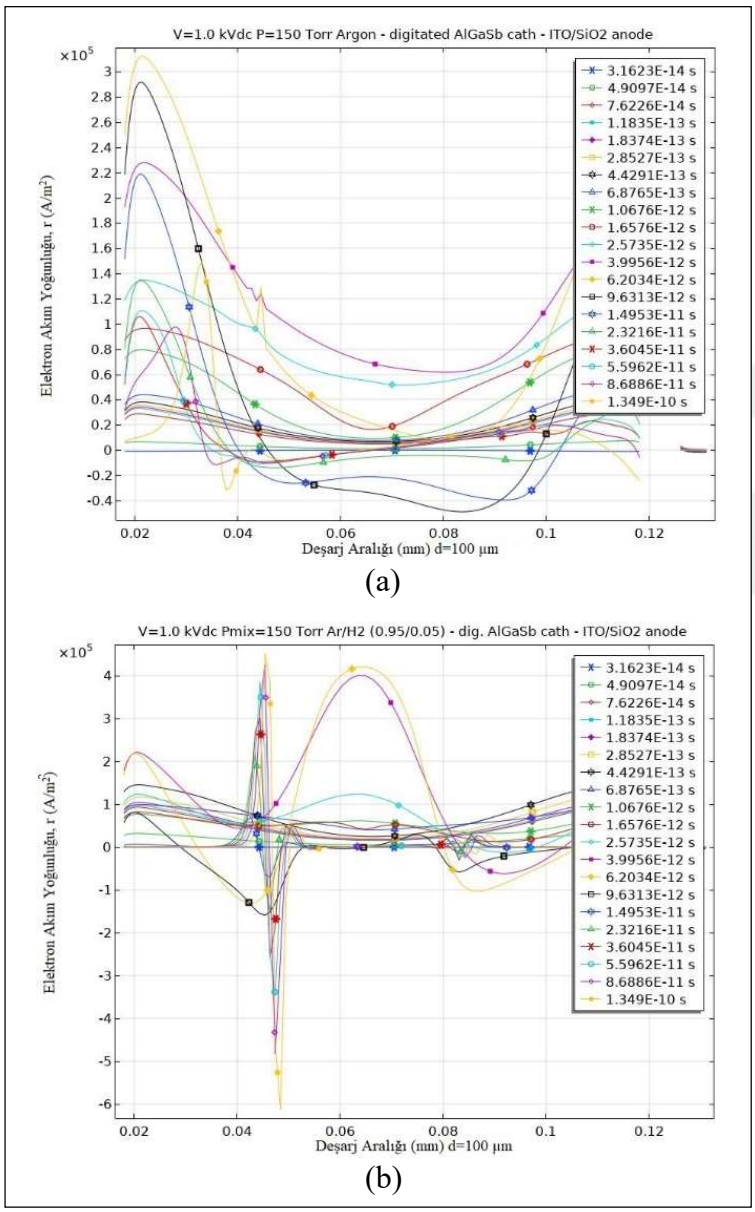


Şekil 3.51. SİM-4 3D-ED$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2

ED parametresi, Ar sisteminde 10 µm-90 µm arasında geniş bir alanda amorf yapıda dağılım gösterirken, Ar/H_2 (95:05) sisteminde reaktör hücre merkezinde daha homojen ve lokalize yapıda gelişmiştir.

Elektron akım yoğunluğu (ECD)

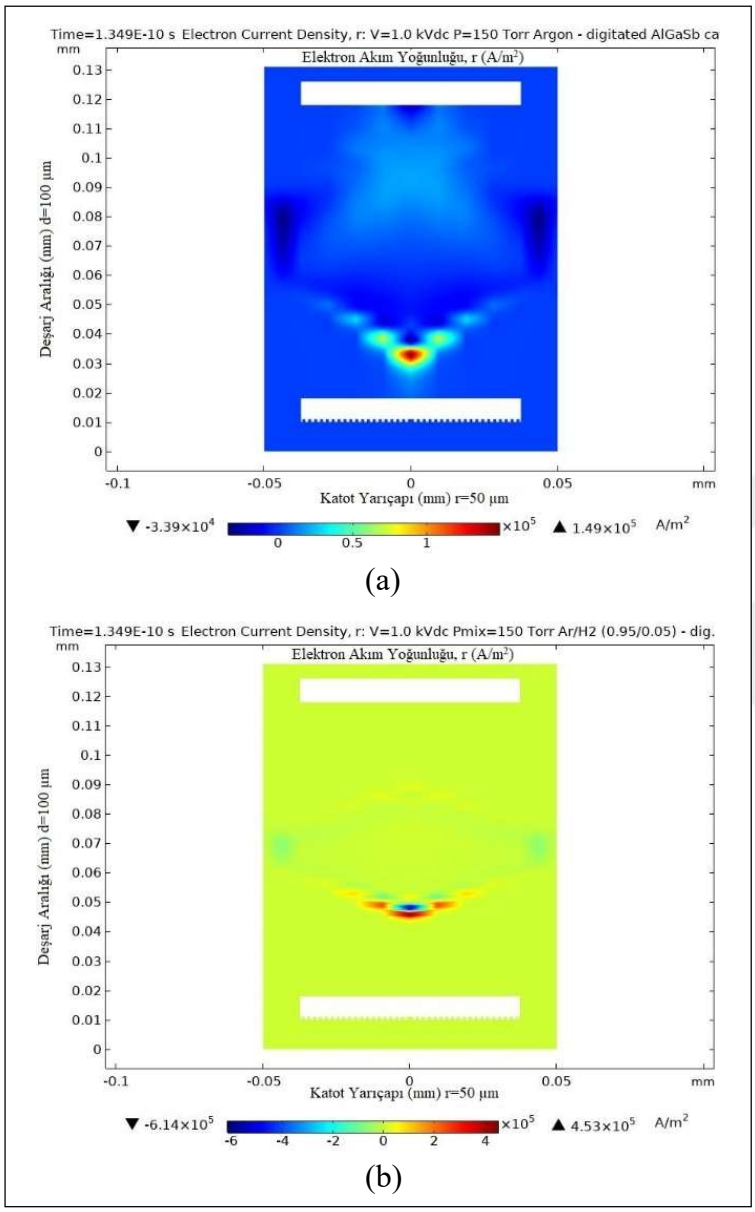
Şekil 3.52'de SİM-4 1D-ECD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için ECD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.52. SİM-4 1D-ECD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot Ar sisteminde $3{,}1623x10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}349x10^{-10}$ s ve Ar/H_2 sisteminde $3{,}1623x10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}349x10^{-10}$ s aralığında gerçekleşen mikro boşalma reaksiyon sekanslarına ait ECD parametresinin deşarj aralığı (d = 100 µm) boyunca değişim grafikleri verilmiştir.

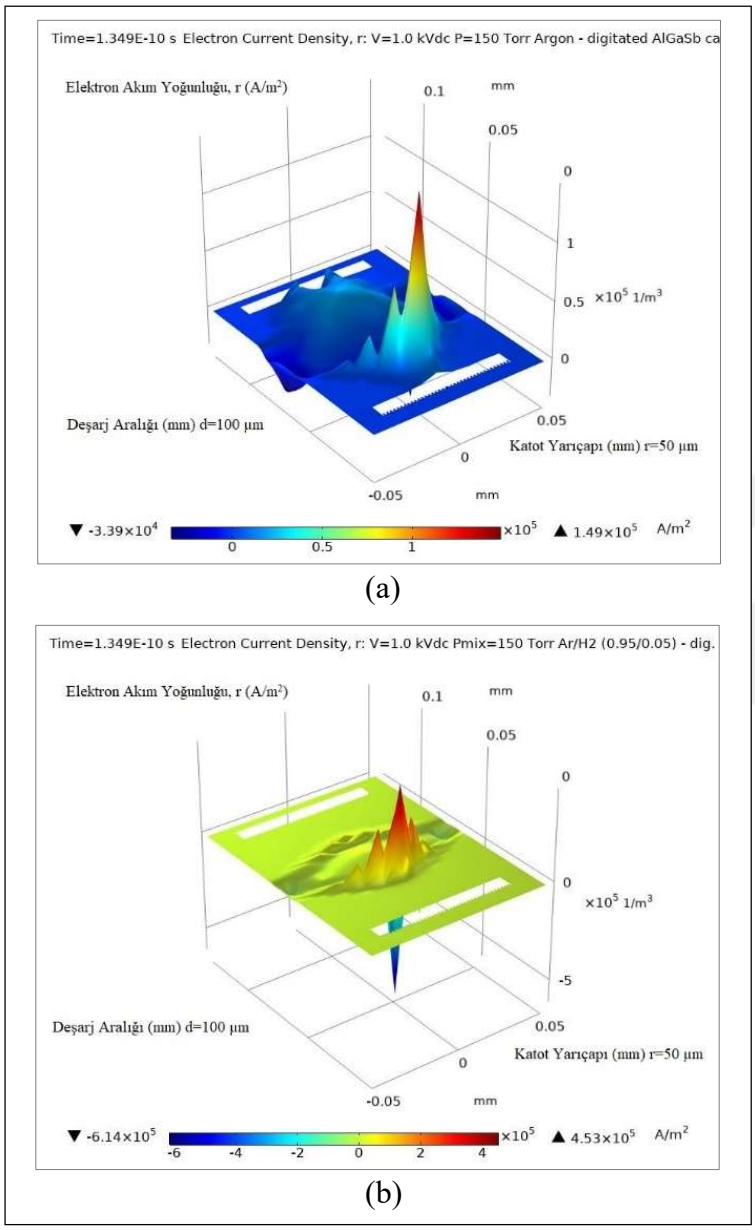
Şekil 3.53'te SİM-4 2D-ECD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ECD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.53. SİM-4 2D-ECD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2

ECD tepe noktası değerleri, sırasıyla, mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot Ar sisteminde 1,49x10^5 (A/m^2), mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot Ar/H_2 (95:05) sisteminde 4,53x10^5 (A/m^2) elde edilmiştir. Mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot Ar/H_2 gaz karışımlı plazma sisteminde ECD parametresinin genlik olarak kısmen yükseldiği ve uzay-zamansal dağılımının daha homojen ve lokalize yapıda geliştiği görülmüştür.

Şekil 3.54'te SİM-4 3D-ECD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ECD grafikleri verilmiştir.

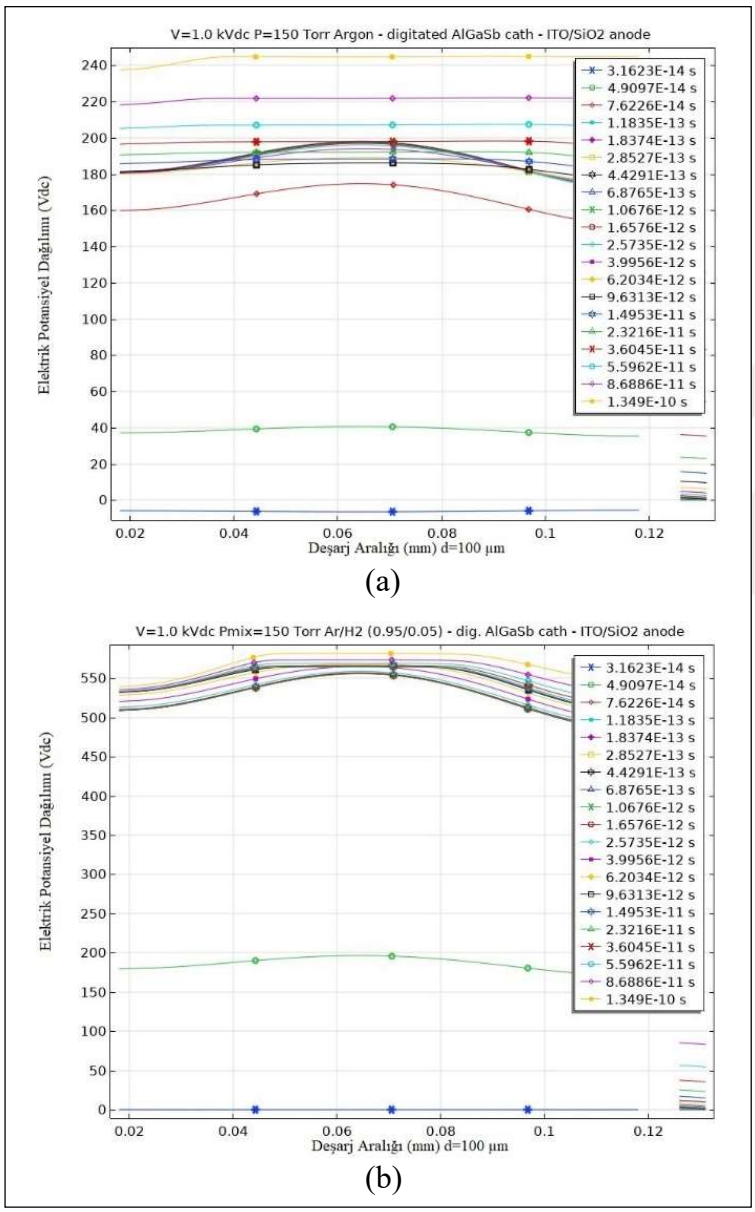


Şekil 3.54. SİM-4 3D-ECD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot Ar sisteminde ECD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımının homojen lokalize formda geliştiği ve Ar/H_2 (95:05) sisteminde ECD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımının konsantrik ve lokalize geliştiği görülmüştür.

Elektrik potansiyel dağılımı (EPD)

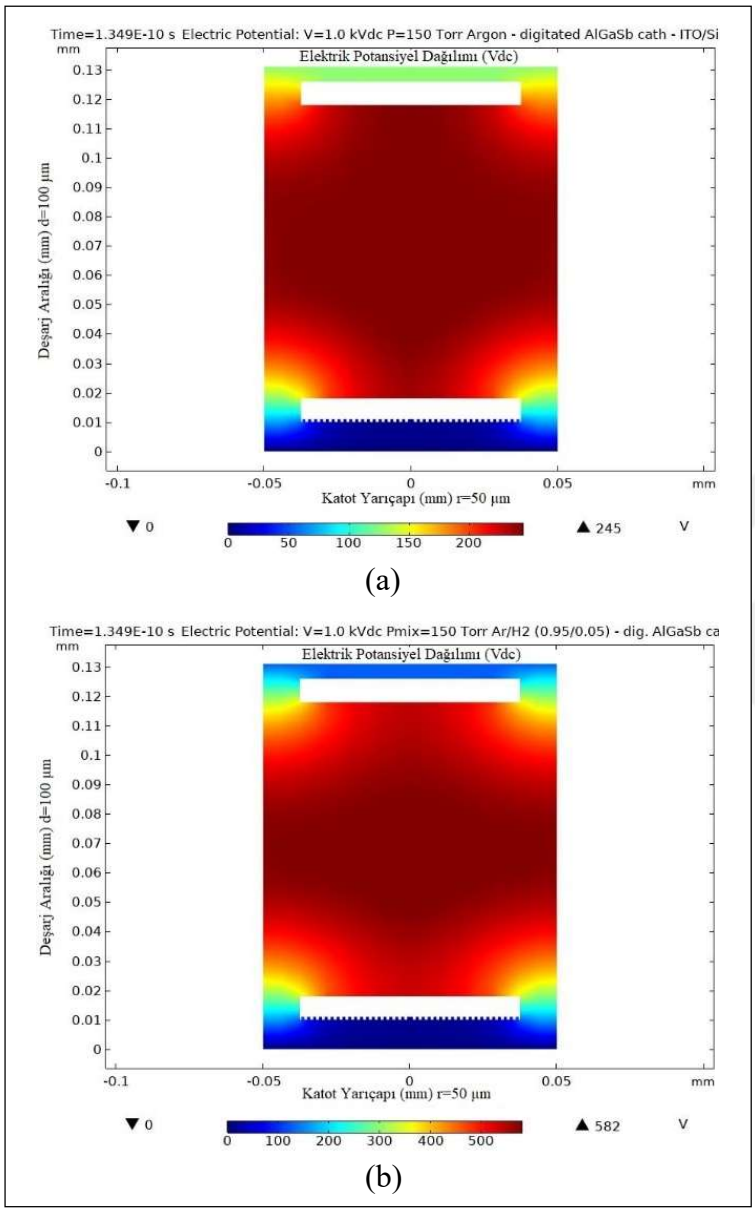
Şekil 3.55'te SİM-4 1D-EPD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için EPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.55. SİM-4 1D-EPD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot Ar sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}349 \times 10^{-10}$ s ve Ar/H_2 sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}349 \times 10^{-10}$ s aralığında gerçekleşen mikro deşarj reaksiyon sekanslarına ait EPD parametresinin deşarj aralığı boyunca değişim grafikleri verilmiştir.

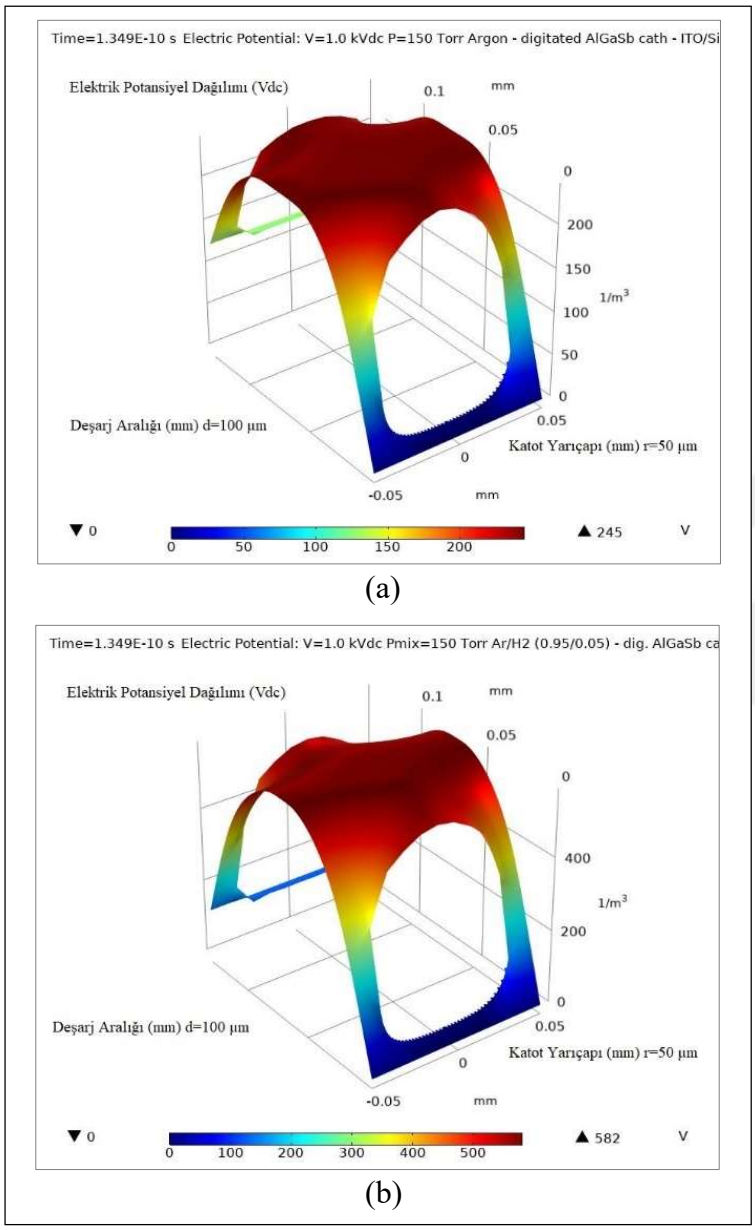
Şekil 3.56'da SİM-4 2D-EPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için EPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.56. SİM-4 2D-EPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro deşarj reaksiyon sekansının son zaman diliminde EPD parametresi, mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot Ar sisteminde 245 V (t_s = 1,349x10^{-10} s) ve Ar/H_2 sisteminde 582 V (t_s = 1,349x10^{-10} s) olduğu görülmüştür. Sekans süreleri aynı olan iki modelin EPD parametreleri kıyaslandığında; Ar/H_2 sisteminde oluşan EPD değerinin Ar sisteminden daha yüksek gerçekleştiği (yaklaşık iki katı seviyesinde) görülmüştür.

Şekil 3.57'de SİM-4 3D-EPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için EPD grafikleri verilmiştir.

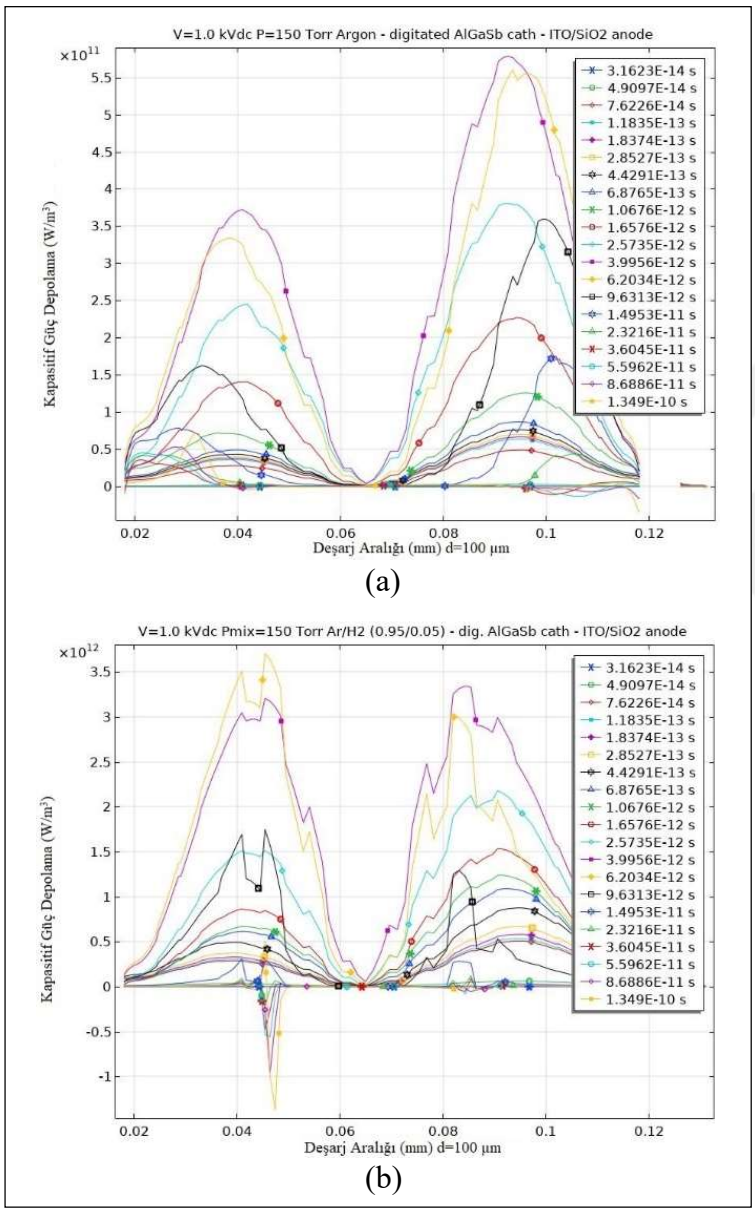


Şekil 3.57. SİM-4 3D-EPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro deşarj reaksiyon sekansının son zaman diliminde EPD parametresinin boşalma aralığı (d = 100 µm) ve katot yarıçapı (r = 50 µm) eksenlerine göre değişim grafikleri verilmiştir. Mikroplazmanın uzay-zamansal hızlı ve karmaşık değişimi, hücre boyunca EPD parametresinin homojenliğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu dağılım sabit tutulmazsa, katot ve anot elektrotları arasında farklı glow boşalma alanları oluşmaktadır.

Kapasitif güç depolama (CPD)

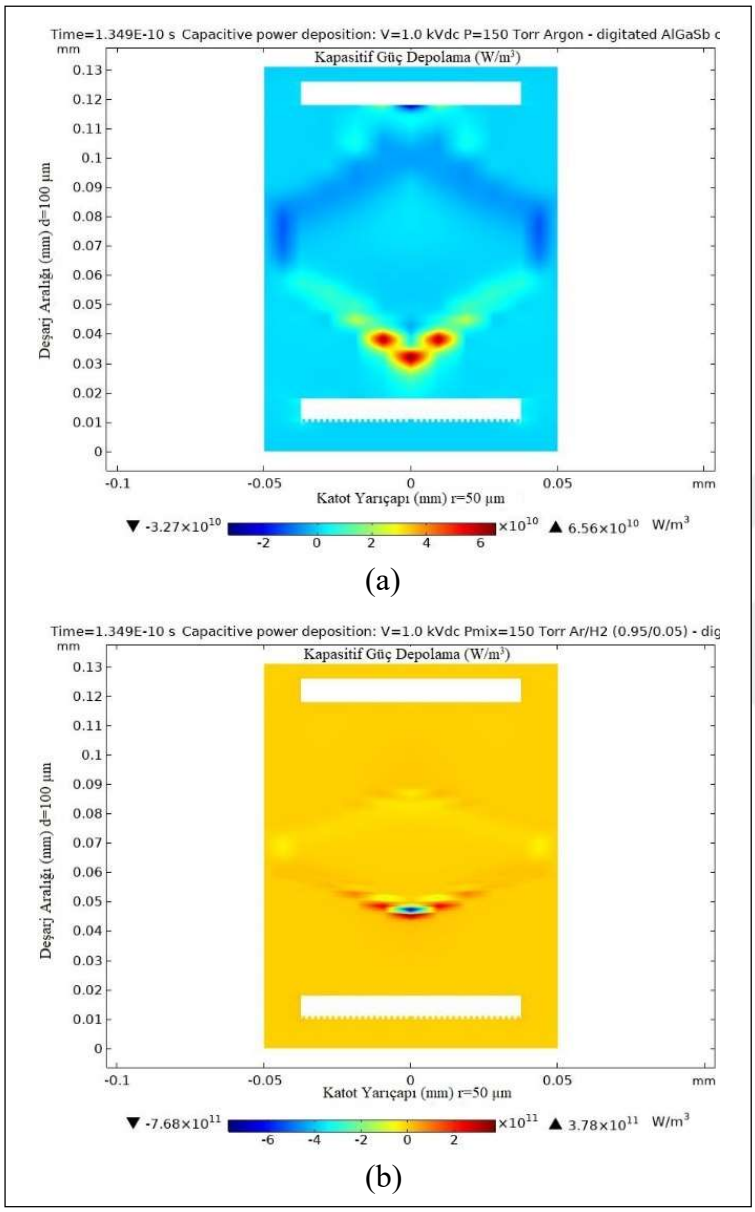
Şekil 3.58'de SİM-4 1D-CPD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için CPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.58. SİM-4 1D-CPD$_{sekans}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot Ar sisteminde $3{,}1623x10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}349x10^{-10}$ s ve Ar/H_2 sisteminde $3{,}1623x10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}349x10^{-10}$ s aralığında gerçekleşen mikro boşalma reaksiyon sekanslarına ait CPD parametresinin boşalma aralığı (d = 100 µm) boyunca değişim grafikleri verilmiştir.

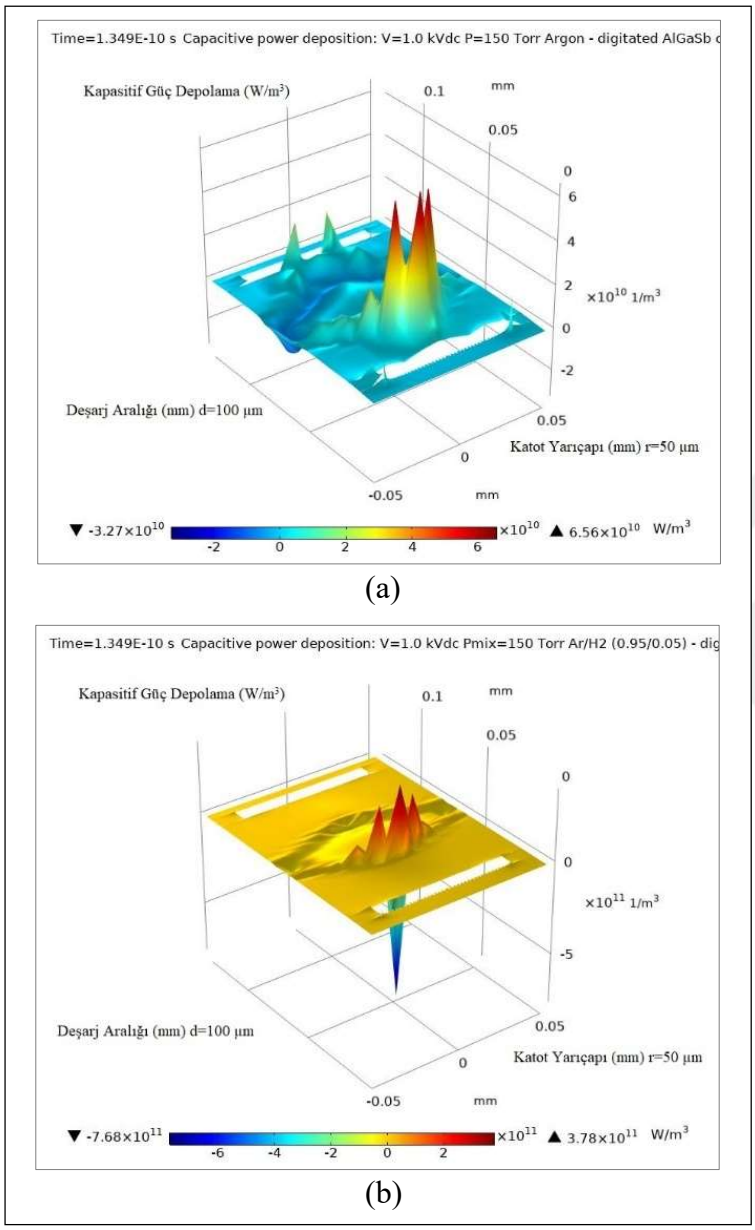
Şekil 3.59'da SİM-4 2D-CPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için CPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.59. SİM-4 2D-CPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Ar sisteminde 30-40 µm arasında tepe değeri 6,56x10^{10} (W/m^3) olan lokalize CPD yoğunluk alanının olduğu görülmüştür. Ar/H_2 sisteminde 40-50 µm arasında tepe değeri 3,78x10^{11} (W/m^3) olan lokalize CPD yoğunluk alanının olduğu görülmüştür. H_2 karışımlı Ar sisteminde CPD parametresinin genlik değerinin arttığı ve daha lokalize geliştiği görülmüştür.

Şekil 3.60'ta SİM-4 3D-CPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için CPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.60. SİM-4 3D-CPD$_{sekans-son}$ mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot Ar/H_2 sisteminde gelişen CPD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımının, mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot Ar sisteminde gelişen CPD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımına kıyasla, daha lokalize ve yüksek genlikte geliştiği görülmektedir. Mikroplazmanın termodinamik kararsız doğası, reaktörde elektriksel kırılım meydana gelmeden önce önemli miktarda güç kaybına neden olmaktadır.

Çizelge 3.8'de SİM-4 simülasyon çalışmasında elde edilen parametre verileri özetlenmiştir.

Çizelge 3.8. SİM-4 simülasyon çalışmasına ait sonuç verileri

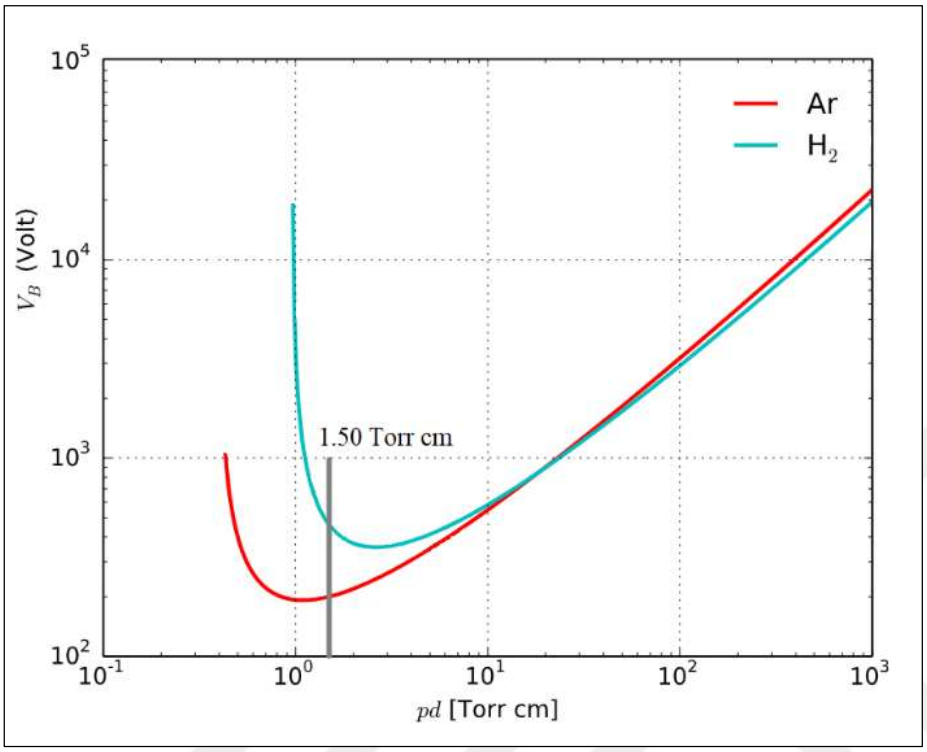
	Gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma sistemi (GDSμP)	
Model ►	Modifiye Model	Modifiye/Karışım Model
Parametre ▼	AlGaSb-Ar Mikro-desenli düzlemsel katot	AlGaSb -Ar/H_2 Mikro-desenli düzlemsel katot
SS_o	Simülasyon sekans başlangıç (s):	
	$3{,}1623x10^{-14}$	$3{,}1623x10^{-14}$
SS_s	Simülasyon sekans son (s):	
	$1{,}349x10^{-10}$	$1{,}349x10^{-10}$
ED_0	Elektron yoğunluğu, sekans-başlangıç ($1/m^3$)	
	$1{,}00x10^{17}$	$1{,}00x10^{17}$
ED_s	Elektron yoğunluğu, sekans-son ($1/m^3$)	
	$2{,}02x10^{19}$	$8{,}44x10^{19}$
ECD_s	Elektron akım yoğunluğu, sekans-son (A/m^2)	
	$1{,}49x10^{5}$	$4{,}53x10^{5}$
EPD_s	Elektrik potansiyel dağılımı, sekans-son (V)	
	245	582
CPD_s	Kapasitif güç depolama, sekans-son (W/m^3)	
	$6{,}56x10^{10}$	$3{,}78x10^{11}$

Çizelge 3.8. simülasyon sonuç verilerine göre;

1) AlGaSb-Ar/H_2 mikroplazma sistemindeki elektron yoğunluğu (ED_s) ve elektron akım yoğunluğu (ECD_s) değerleri genlik olarak, AlGaSb-Ar mikroplazma sisteminden yaklaşık dört kat yüksektir.
2) AlGaSb-Ar/H_2 mikroplazma sistemindeki kapasitif güç depolama (CPD_s) değeri genlik olarak, AlGaSb-Ar mikroplazma sisteminden yaklaşık altı kat yüksektir.
3) AlGaSb-Ar/H_2 mikroplazma sistemindeki elektrik potansiyel dağılım (EPD_s) değeri genlik olarak, AlGaSb-Ar mikroplazma sisteminden yaklaşık 337 VDC yüksektir.

Gaz ortamının elektriksel kırılım gerilimi (V_{BD}); gaz basıncı (P, Torr) ve anot-katot elektrotlar arası deşarj aralığı (d, cm) çarpımı P.d (Torr.cm) Paschen çarpımı ifadesi ile tanımlanmıştır.

Şekil 3.61'de SİM-4 hücre modelinde kullanılan argon/hidrojen plazma reaktörünün çalışma bölgesi Paschen eğrisi üzerinde P.d = 1,5 Torr.cm çarpımı ile gösterilmiştir.



Şekil 3.61. SİM-4 Ar/H_2-Paschen çalışma bölgesi (1,5 Torr.cm)

SİM-4 simülasyon sayısal analiz çalışmamız neticesinde; mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot elektrota sahip Ar/H_2 mikroplazma modülünün, mikro-desenli düzlemsel AlGaSb katot elektrota sahip Ar mikroplazma modülünden elektron yoğunluğu, elektron akım yoğunluğu ve kapasitif güç depolama parametreleri kıyaslandığında daha kararlı ve yüksek verimde çalışacağı sonucuna varılmıştır.

Tez çalışmamız kapsamında hedeflenen Ar/H_2 ikili gaz karışımının mikroplazma parametreleri üzerindeki pozitif katkısı, farklı bir yarıiletken malzeme AlGaSb ile modellenerek de incelenmiştir [74-76]. Grup III-V bileşik yarıiletken malzemesi AlGaSb, yakın/kısa dalga kızılötesinden (NIR/SWIR) uzak dalga kızılötesine (FIR) kadar geniş spektral bant aralıklarına sahip kızılötesi foto algılayıcı ve görüntü çevirici uygulamalarında kullanım potansiyeli olan üçlü alaşım yarıiletken malzemesidir. Ayarlanabilir geniş bant aralığı sayesinde uygulamaya özel kızılötesi foto algılayıcı ve görüntü çevirici aygıtlar için farklı tasarım ve modelleme kabiliyeti sağlayacaktır.

3.2.5. Simülasyon analiz çalışması (SİM-5)

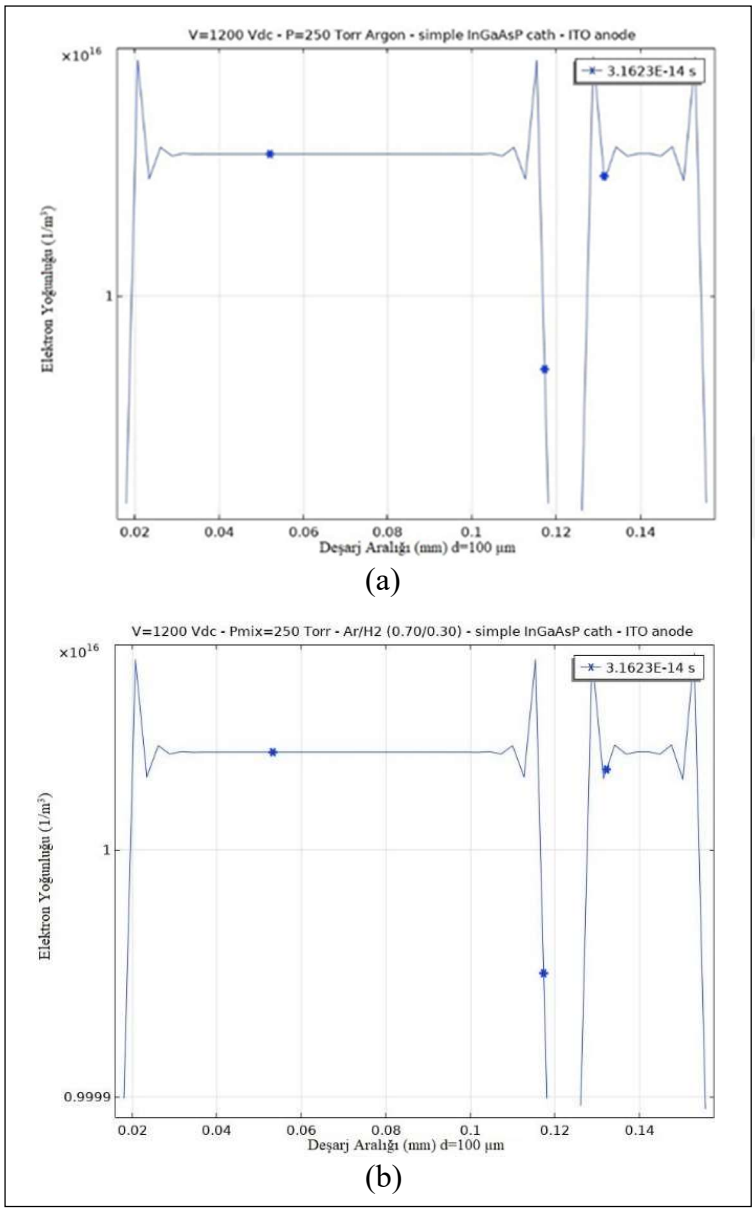
İndiyum galyum arsenit fosfit (InGaAsP) yarıiletken alaşım malzemenin birçok önemli elektronik aygıt uygulaması yanında potansiyel öneme sahip diğer bir uygulama alanı da yarıiletken lazer sistemleri ve 1,55 µm dalgaboyundaki fiber optik haberleşme alanıdır. Bu nedenle, simülasyon sayısal analiz çalışmalarımızda; InGaAsP-Ar/H_2 mikroplazma sistemi farklı bir reaktör modeli üzerinde incelendi. Çizelge 3.9'da SİM-5 simülasyon çalışmasına ait temel parametreler tanımlandı.

Çizelge 3.9. SİM-5 simülasyon çalışmasına ait parametre tanımları

Parametre	Tanım	
Simülasyon Çalışması Kodu	SİM-5	
GDSµPS (gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma sistemi)	InGaAsP-Ar	InGaAsP-Ar/H_2
Simülasyon Modelleri	Temel model	Karışım model
Hücre yapısı	İki-boyutlu eliptik geometrili düzlemsel reaktör	
Hücre besleme gerilimi	V = 1,2 kVDC	
Plazma proses gaz tipi ve karışım oranı	Argon (Ar)	Argon/hidrojen karışımı Ar/H_2 (%30)
Plazma proses gaz basıncı	P = 250 Torr	
Elektrotlar arası mesafe (anot-katot)	d = 100 µm	
Fotokatot elektrot malzemesi	$In_xGa_{1-x}As_{1-y}P_y$ ya da $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$; x=0.48; y=0.24 GaAs-InAs-GaP-InP (İndiyum galyum arsenit fosfit, InGaAsP) (Adachi 1989: n,k 0.207-12.4 µm)	
Fotokatot elektrot elektriksel kontak malzemesi	Altın (Au) ince-film (Johnson ve Christy 1972: n, k 0.188-1.937 µm)	
Fotokatot elektron emisyon yüzeyi	Basit düzlemsel	
Fotokatot elektrot çapı	r = 37.5 µm	
Anot elektrot malzemesi	Silika (SiO_2) (Malitson 1965: Fused silica; n 0.21-6.7 µm)	
Anot elektrot elektriksel kontak malzemesi	İndiyum kalay oksit (ITO) ince-film (Moerland ve Hoogenboom 2016: n,k 0.4-1.0 µm)	
Gaz ortamdaki başlangıç (tohum) elektron yoğunluğu	$n_{e,o} = 1{,}0x10^{16}$ ($1/m^3$)	
Paschen çarpımı	P.d = 250 Torr.100 µm = 2,5 Torr.cm	
Hücre çalışma ortam sıcaklığı	T = 300 K	

Elektron yoğunluğu (ED)

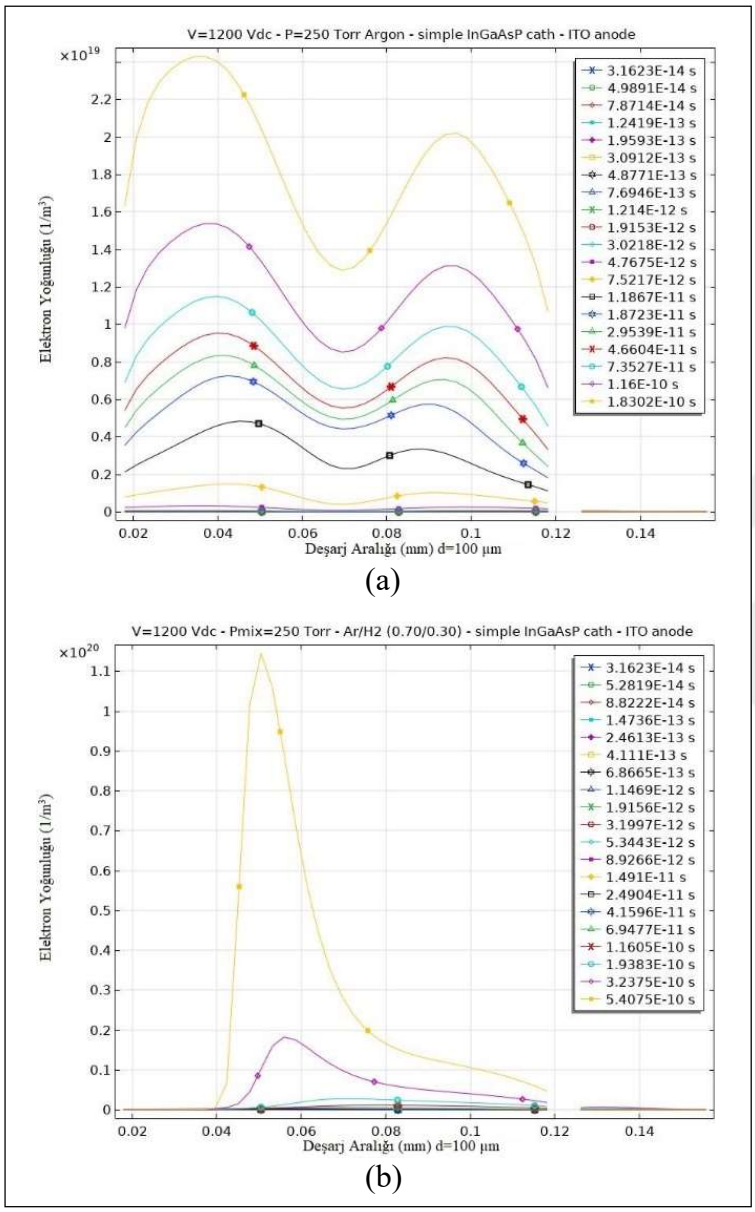
Şekil 3.62'de SİM-5 1D-$ED_{sekans\text{-}başlangıç}$ basit düzlemsel InGaAsP katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için ED grafikleri verilmiştir. Reaktör gaz ortamdaki başlangıç elektron yoğunluk değeri $1{,}0x10^{16}$ ($1/m^3$) alınmıştır.



Şekil 3.62. SİM-5 1D-$ED_{sekans\text{-}başlangıç}$ basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Başlangıçta (t_0=3,1623x10^{-14} s) arka plan iyonizasyon reaksiyonları devam etmesine rağmen, Townsend (TA) iyonizasyon reaksiyon süreci henüz başlamadığından ve gaz ortamın elektriksel kırılımı (V_{BD}) gerçekleşmediğinden dolayı ED parametresi, reaktör odacığında kararsız ve ortalama bir dağılım göstermektedir.

Şekil 3.63'te SİM-5 1D-ED_{sekans} basit düzlemsel InGaAsP katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için ED grafikleri verilmiştir.

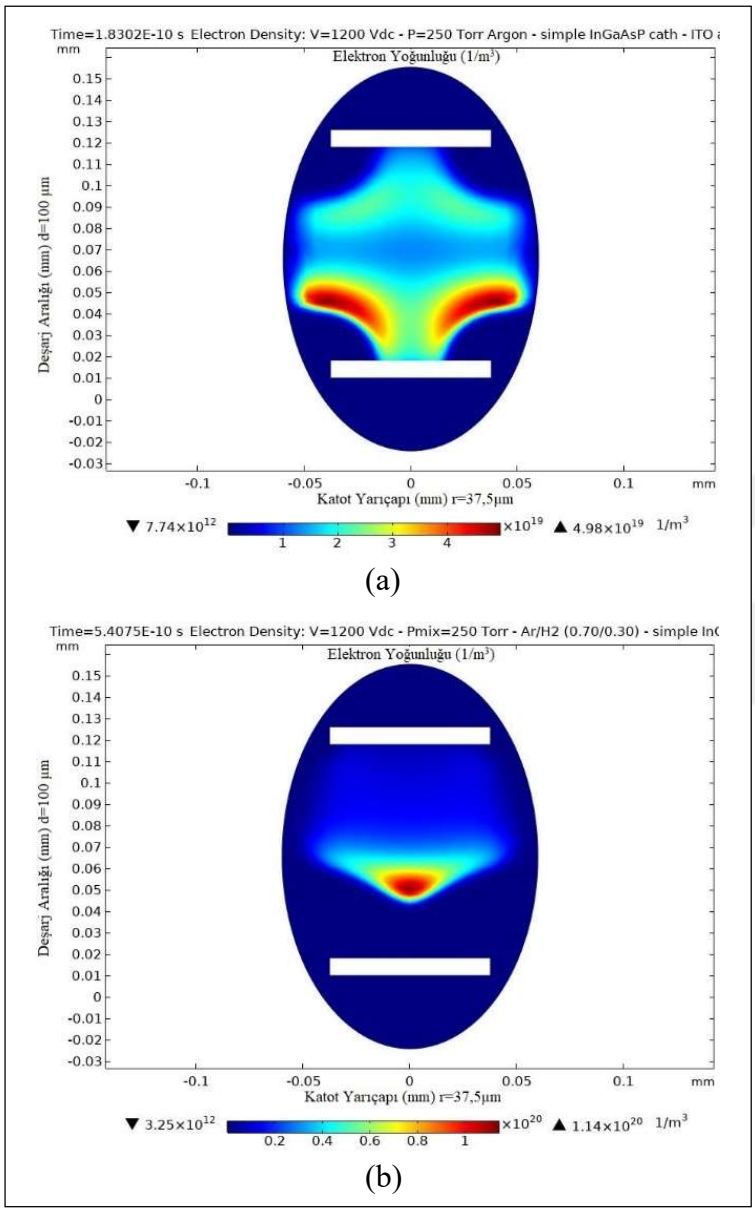


Şekil 3.63. SİM-5 1D-ED_{sekans} basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Karşılaştırmalı modellerin mikroplazma reaksiyon sekansları, simülasyon zaman cetvelinde sırasıyla, basit düzlemsel InGaAsP katot Ar sisteminde $1{,}8302 \times 10^{-10}$ s ve Ar/H_2 (70:30) sisteminde $5{,}4075 \times 10^{-10}$ s zaman diliminde tamamlanmıştır.

ED parametresi, farklı tipteki gaz sistemlerinin (Ar, Ar/H_2) aynı elektron emisyon yüzey morfolojisine sahip katot modellerinde (basit düzlemsel) karakteristik uzay-zamansal davranış sergilemiştir.

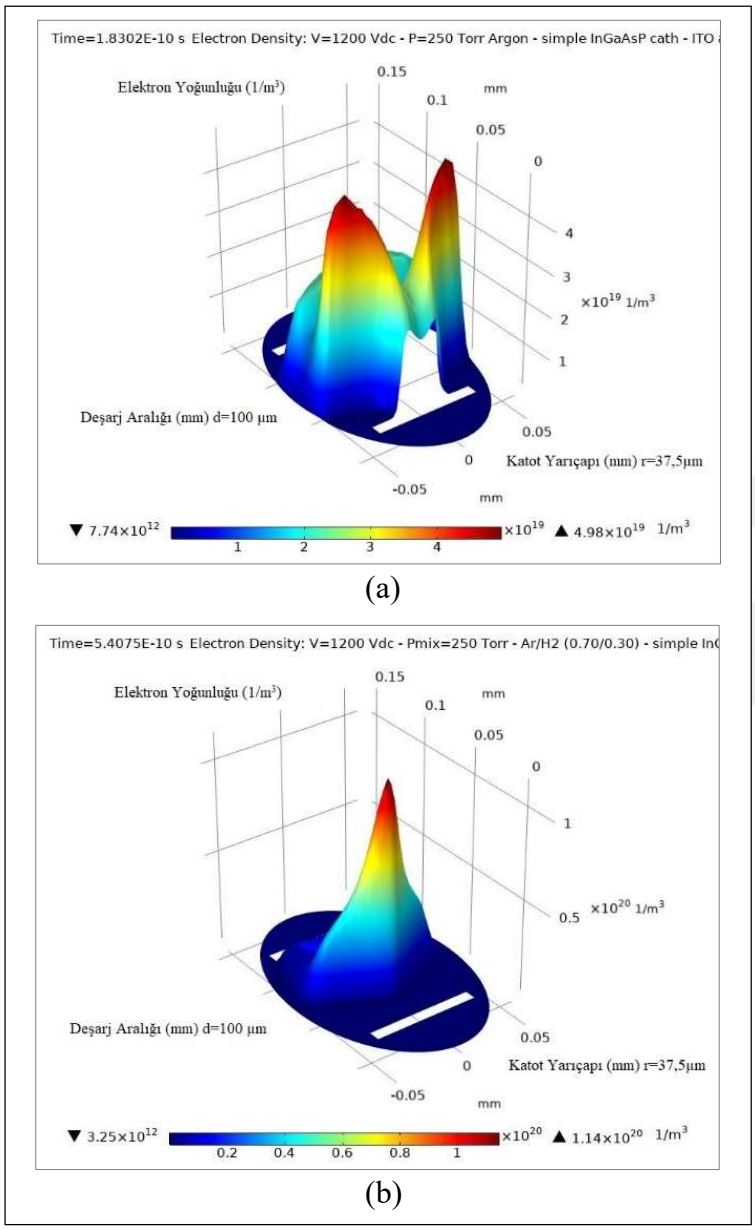
Şekil 3.64'te SİM-5 2D-$ED_{sekans\text{-}son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ED grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.64. SİM-5 2D-$ED_{sekans\text{-}son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2

ED tepe noktası değerleri, sırasıyla, basit düzlemsel InGaAsP katot Ar sisteminde 4,98x10^{19} (1/m^3), Ar/H_2 (70:30) sisteminde 1,14x10^{20} (1/m^3) elde edilmiştir. Ar/H_2 ikili gaz karışım modelinde ED parametresinin genlik olarak yükseldiği ve uzay-zamansal dağılımının reaktör hücre içinde lokal ve merkezi dar bir alanda toplandığı görülmüştür. Normal glow boşalma rejimine hızlı geçişte ED parametresinin uzaysal dağılımındaki kararsızlık durumu etkilidir.

Şekil 3.65'te SİM-5 3D-ED$_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için ED grafikleri verilmiştir.

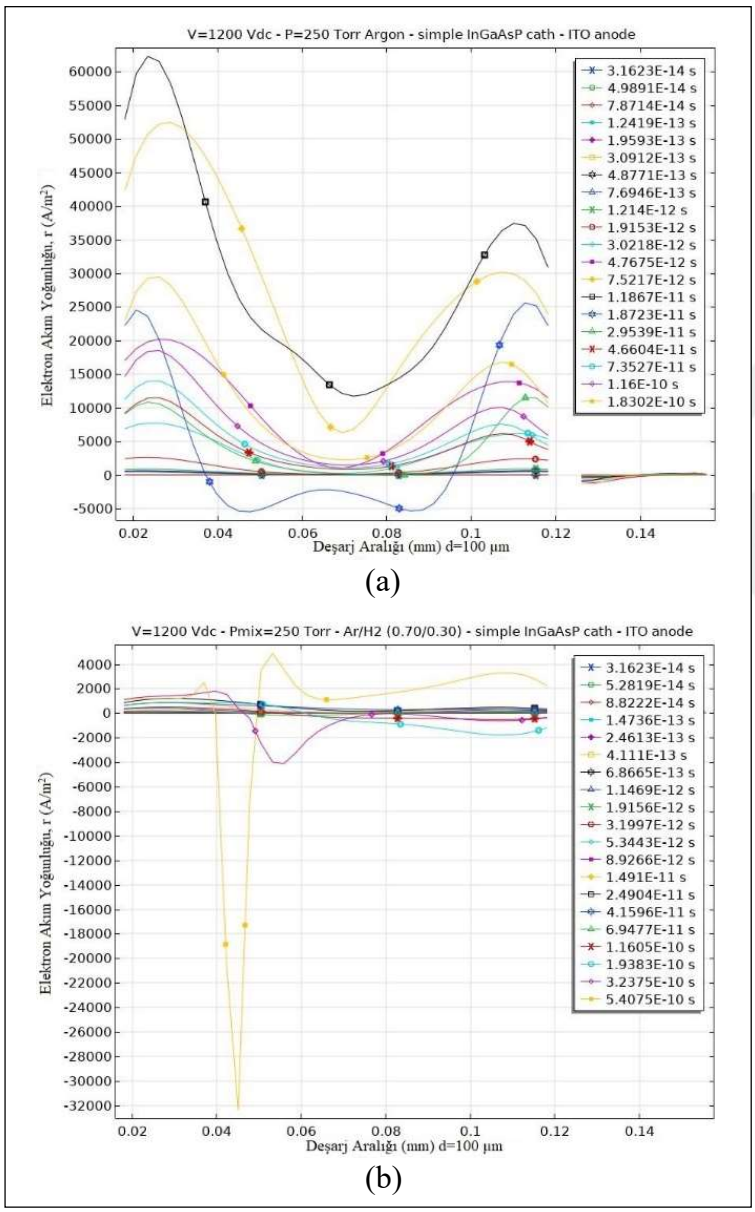


Şekil 3.65. SİM-5 3D-ED$_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2

ED parametresi, Ar sisteminde 10 µm-90 µm arasında geniş bir alanda amorf yapıda dağılım gösterirken, Ar/H_2 (70:30) sisteminde reaktör hücresi içinde dar bir alanda konsantrik ve lokalize tek filament yapıda gelişmiştir.

Elektron akım yoğunluğu (ECD)

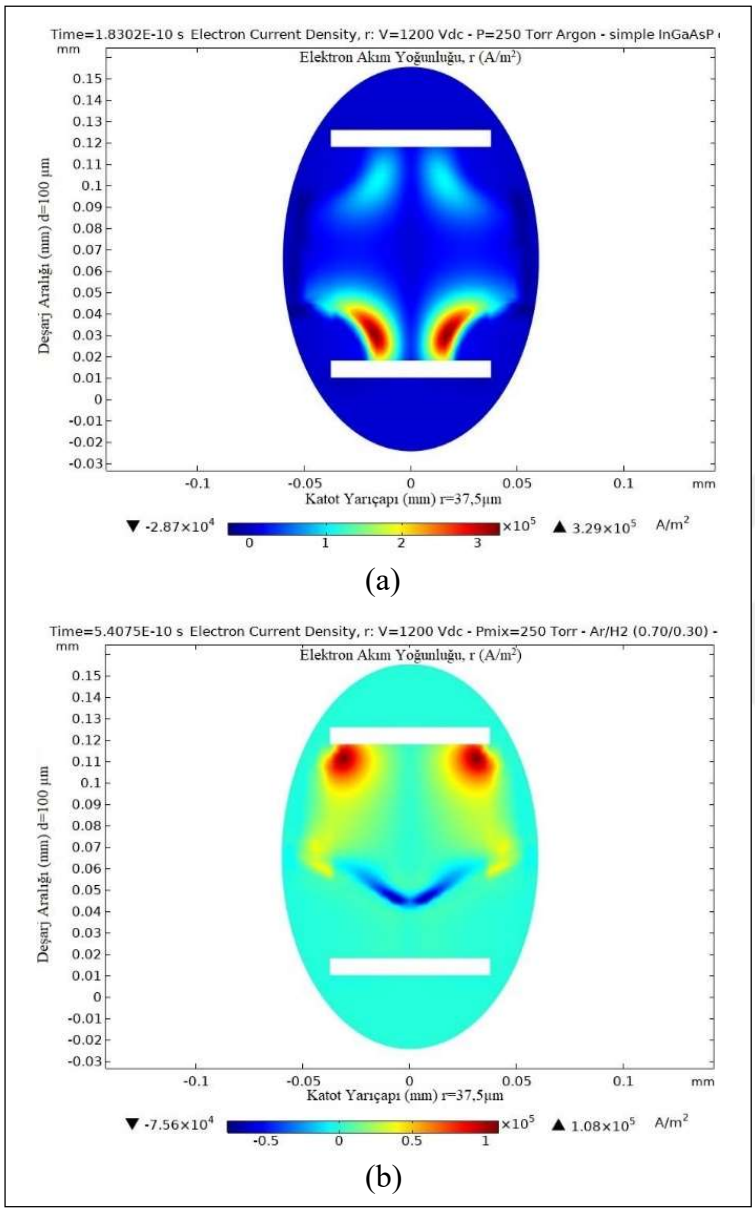
Şekil 3.66'da SİM-5 1D-ECD_{sekans} basit düzlemsel InGaAsP katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için ECD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.66. SİM-5 1D-ECD_{sekans} basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Basit düzlemsel InGaAsP katot Ar sisteminde $3{,}1623x10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}8302x10^{-10}$ s ve Ar/H_2 sisteminde $3{,}1623x10^{-14}$ s ≤ t ≤ $5{,}4075x10^{-10}$ s aralığında gerçekleşen mikro boşalma sekanslarına ait ECD parametresinin boşalma aralığı (d = 100 µm) boyunca değişim grafikleri verilmiştir. Ar/H_2 sisteminde ECD parametresinin katot-anot arasında H_2 konsantrasyonunun artmasıyla azaldığı, Ar sisteminde ise arttığı görülmüştür.

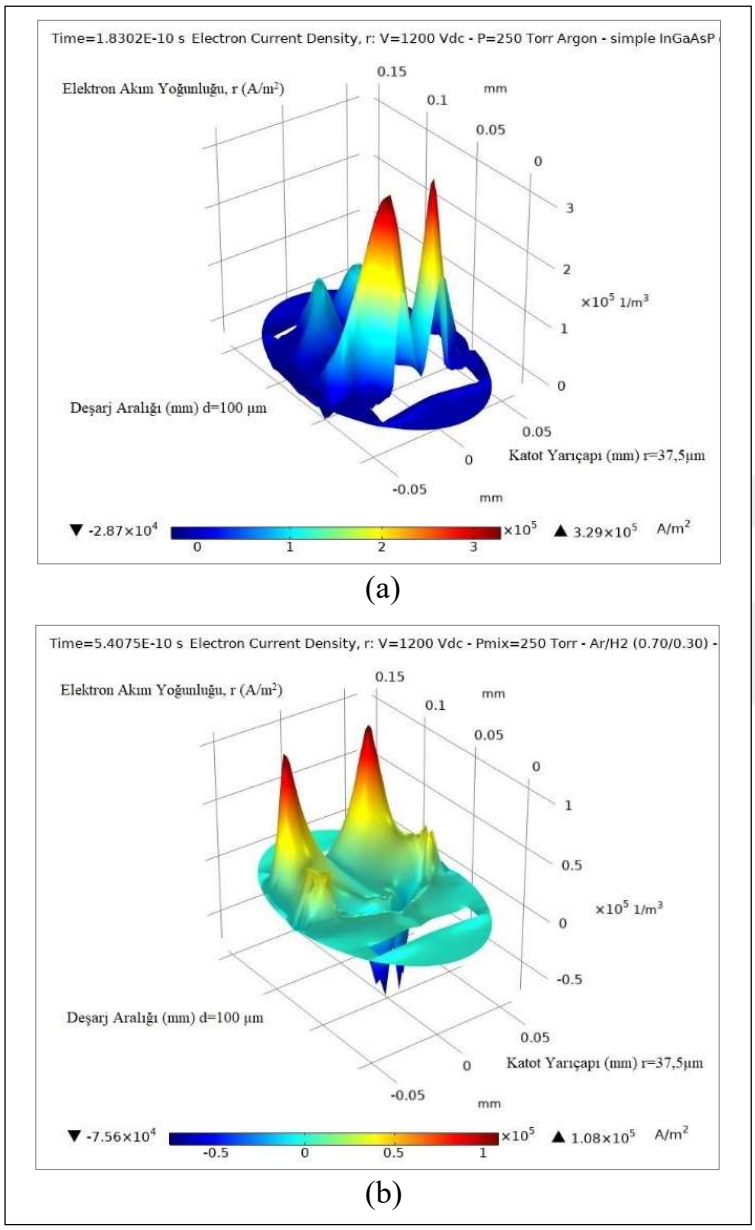
Şekil 3.67'de SİM-5 2D-ECD$_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ECD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.67. SİM-5 2D-ECD$_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2

ECD tepe noktası değerleri, sırasıyla, basit düzlemsel InGaAsP katot Ar sisteminde 3,29x10^5 (A/m^2) ve Ar/H_2 (70:30) sisteminde 1,08x10^5 (A/m^2) elde edilmiştir. ECD parametresinin, Ar/H_2 gaz deşarj sistemininde Maxwell dağılım fonksiyonu davranışını takip ettiği görülmüştür.

Şekil 3.68'de SİM-5 3D-$ECD_{sekans\text{-}son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için ECD grafikleri verilmiştir.

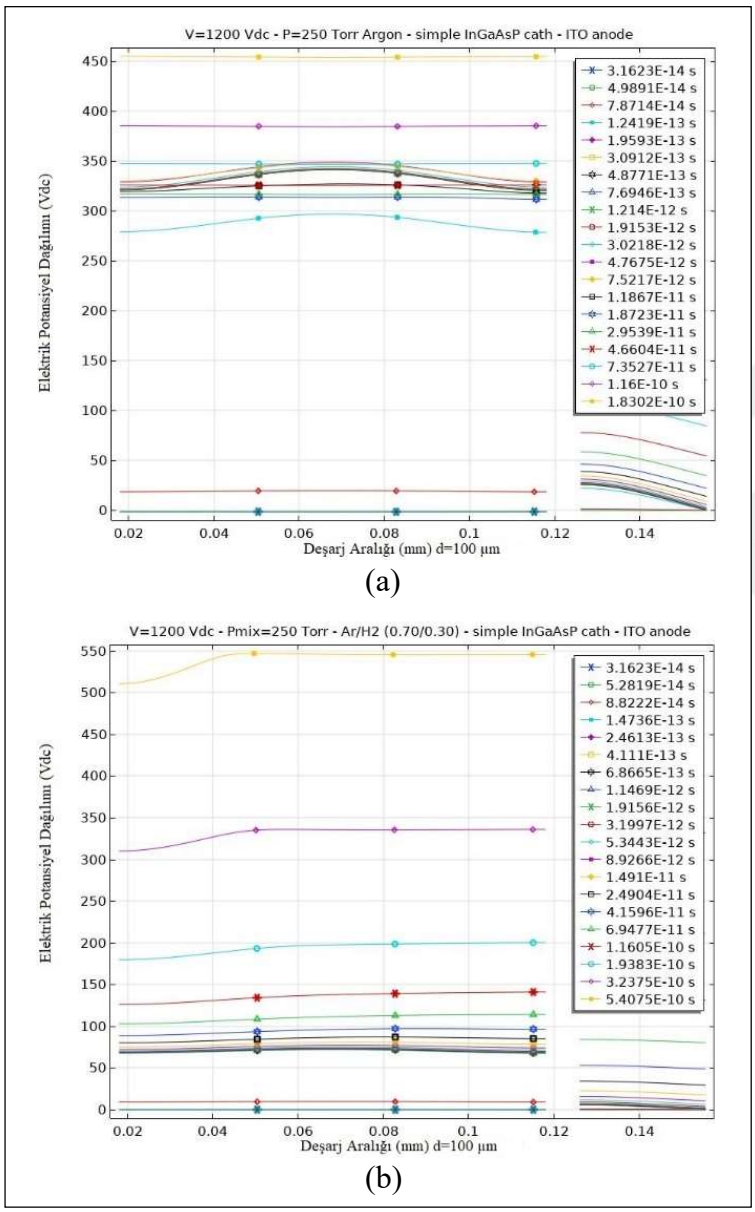


Şekil 3.68. SİM-5 3D-$ECD_{sekans\text{-}son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2

ECD parametresinin lokal olarak anlık azalmasına neden olan negatif diferansiyel iletkenlik (NDC) faktörüdür. Anot-katot DC besleme gerilimi artırıldığında farklı güçlerde yüksek elektron yoğunluğundan düşük elektron yoğunluğuna anlık geçişler meydana gelir. Bu durum gerilim arttıkça azalan NDC faktörü ile uyumludur.

Elektrik potansiyel dağılımı (EPD)

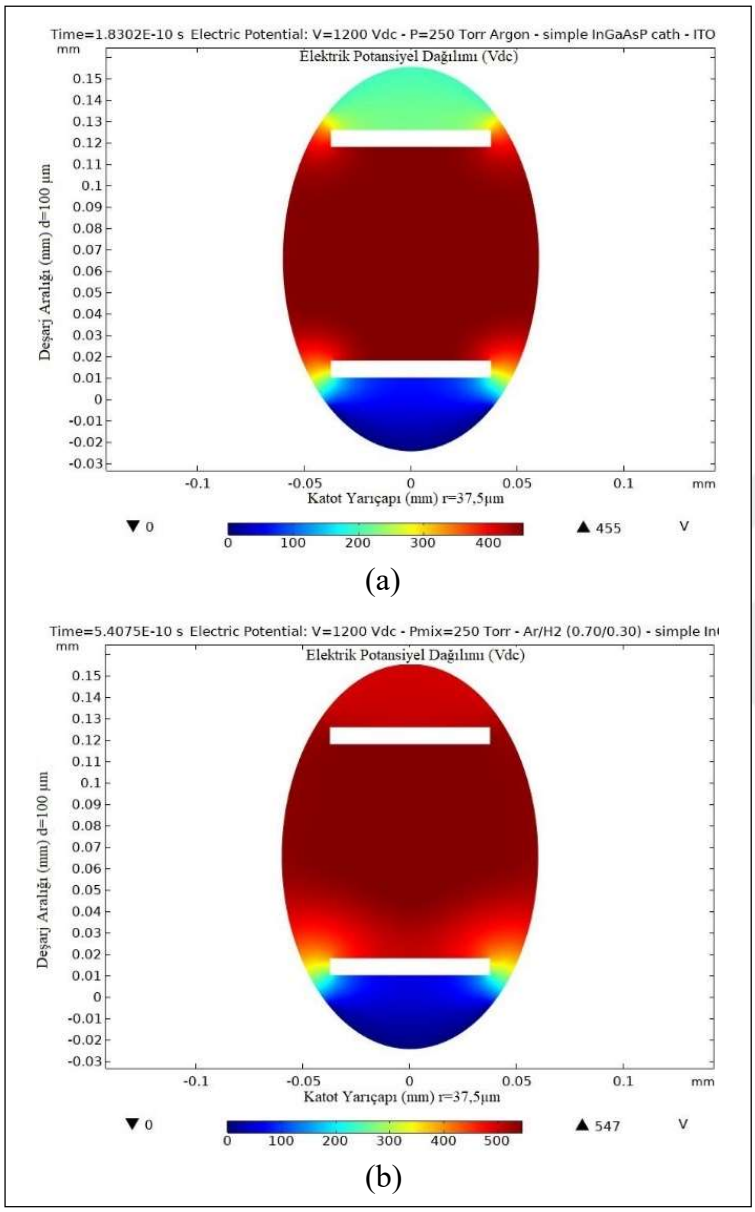
Şekil 3.69'da SİM-5 1D-EPD$_{sekans}$ basit düzlemsel InGaAsP katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için EPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.69. SİM-5 1D-EPD$_{sekans}$ basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Basit düzlemsel InGaAsP katot Ar sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}8302 \times 10^{-10}$ s ve Ar/H_2 sisteminde $3{,}1623 \times 10^{-14}$ s ≤ t ≤ $5{,}4075 \times 10^{-10}$ s aralığında gerçekleşen mikro boşalma reaksiyon sekanslarına ait EPD parametresinin deşarj aralığı (d = 100 µm) boyunca değişim grafikleri verilmiştir.

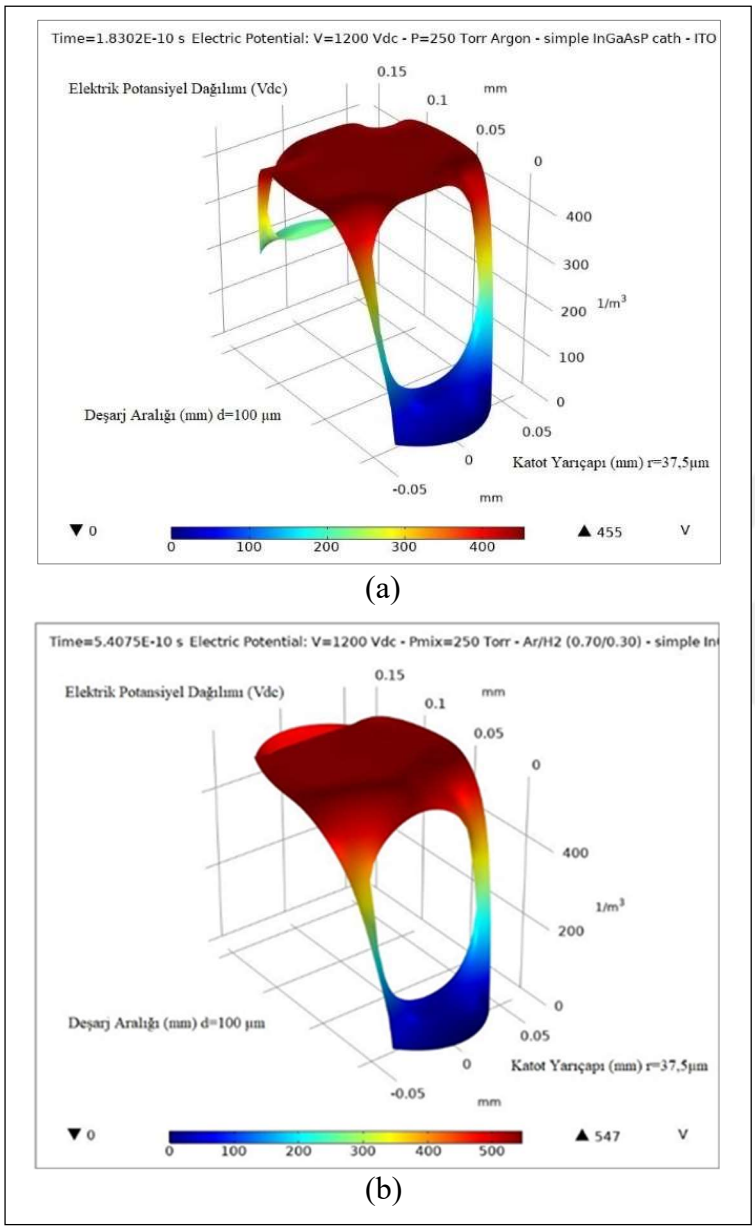
Şekil 3.70'te SİM-5 2D-EPD$_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için EPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.70. SİM-5 2D-EPD$_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro boşalma reaksiyon sekansının son zaman diliminde EPD parametresi, basit düzlemsel InGaAsP katot Ar sisteminde 455 V (t_s = 1,8302x10^{-10} s) ve Ar/H_2 sisteminde ise 547 V (t_s = 5,4075x10^{-10} s) gerçekleşmiştir.

Şekil 3.71'de SİM-5 3D-EPD$_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için EPD grafikleri verilmiştir.

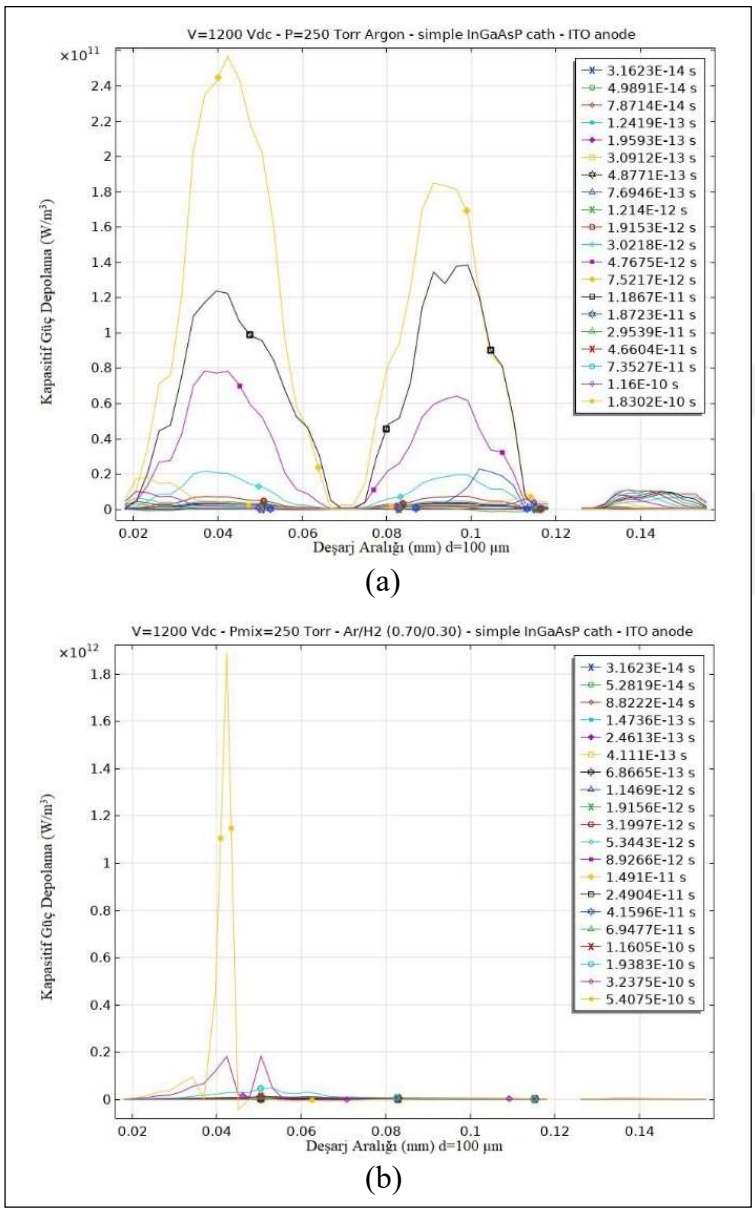


Şekil 3.71. SİM-5 3D-EPD$_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Mikro deşarj reaksiyon sekansının son zaman diliminde EPD parametresinin boşalma aralığı (d = 100 µm) ve katot yarıçapı (r = 37,5 µm) eksenlerine göre değişim grafikleri verilmiştir. Mikroplazmanın uzay-zamansal hızlı ve karmaşık değişimi, hücre boyunca EPD parametresinin homojenliğiyle doğrudan ilişkilidir. Bu dağılım sabit tutulmazsa, katot ve anot elektrotları arasında farklı glow boşalma alanları oluşmaktadır.

Kapasitif güç depolama (CPD)

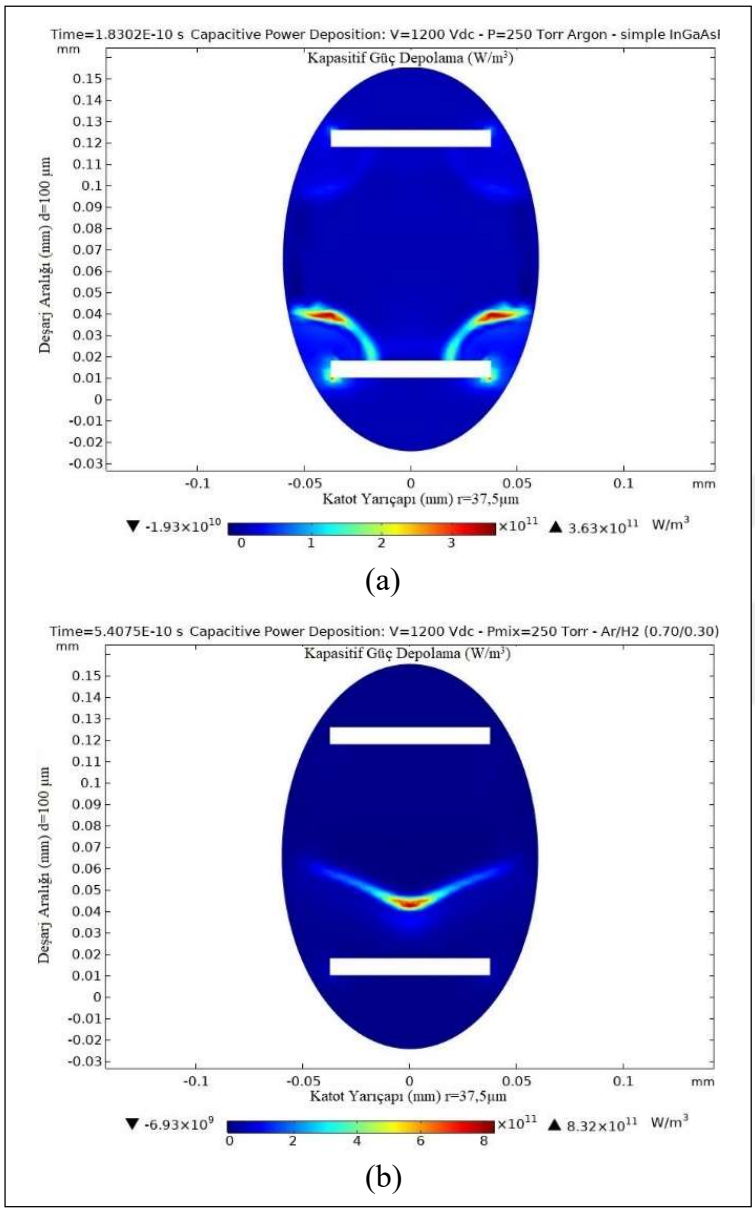
Şekil 3.72'de SİM-5 1D-CPD_{sekans} basit düzlemsel InGaAsP katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 –gaz boşalma modelleri için CPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.72. SİM-5 1D-CPD_{sekans} basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Basit düzlemsel InGaAsP katot Ar sisteminde $3{,}1623x10^{-14}$ s ≤ t ≤ $1{,}8302x10^{-10}$ s ve Ar/H_2 sisteminde $3{,}1623x10^{-14}$ s ≤ t ≤ $5{,}4075x10^{-10}$ s aralığında gerçekleşen mikro boşalma reaksiyon sekanslarına ait CPD parametresinin deşarj aralığı (d = 100 µm) boyunca değişim grafikleri verilmiştir.

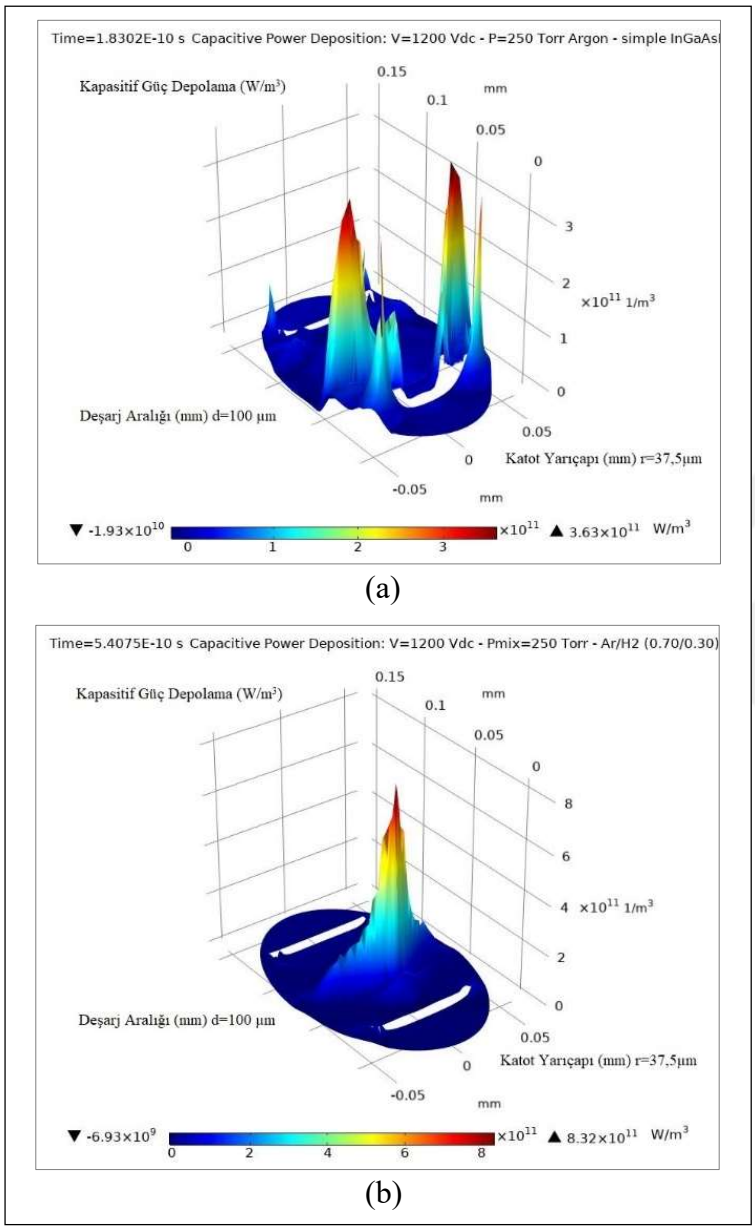
Şekil 3.73'te SİM-5 2D-CPD$_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz boşalma modelleri için CPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.73. SİM-5 2D-CPD$_{sekans-son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Ar sisteminde 40 µm civarında tepe değeri 3,63x10^{11} (W/m^3) olan simetrik lokalize çift CPD yoğunluk alanının olduğu görülmüştür. Ar/H_2 sisteminde 45 µm civarında tepe değeri 8,32x10^{11} (W/m^3) olan lokalize tek CPD yoğunluk alanının olduğu görülmüştür. H_2 karışımlı Ar sisteminde CPD parametresinin genlik değerinin arttığı, daha lokalize ve kararlı geliştiği görülmüştür.

Şekil 3.74'te SİM-5 3D-$CPD_{sekans\text{-}son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot mikroplazma sistemine ait Ar ve Ar/H_2 -gaz deşarj modelleri için CPD grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.74. SİM-5 3D-$CPD_{sekans\text{-}son}$ basit düzlemsel InGaAsP katot (a) Ar (b) Ar/H_2

Basit düzlemsel InGaAsP katot Ar/H_2 sisteminde gelişen CPD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımının basit düzlemsel InGaAsP katot Ar sisteminde gelişen CPD parametresinin üç boyutlu uzaysal dağılımına kıyasla, daha kararlı, tek filament yapıda, daha lokalize ve yüksek genlikte geliştiği görülmektedir. Mikroplazmanın termodinamik kararsız doğası, reaktörde elektriksel kırılım meydana gelmeden önce önemli miktarda güç kaybına neden olmaktadır.

Çizelge 3.10'da SİM-5 simülasyon çalışmasında elde edilen parametre verileri özetlenmiştir.

Çizelge 3.10. SİM-5 simülasyon çalışmasına ait sonuç verileri

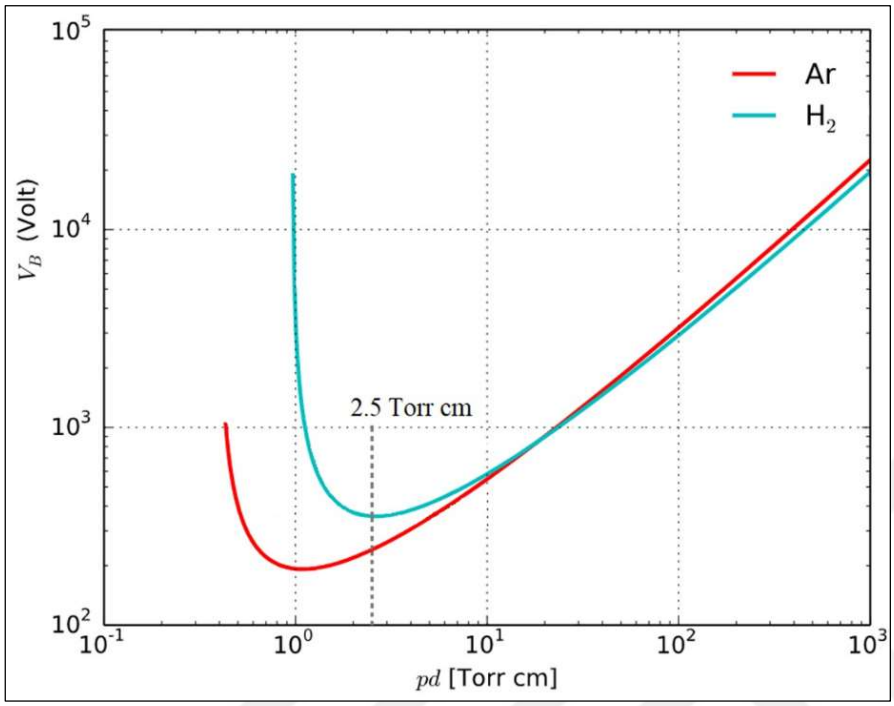
	Gaz deşarj-yarıiletken mikroplazma sistemi (GDSμP)	
Model ►	Temel Model	Karışım Model
Parametre ▼	InGaAsP-Ar Basit düzlemsel katot	InGaAsP-Ar/H_2 Basit düzlemsel katot
SS_o	Simülasyon sekans başlangıç (s):	
	$3{,}1623x10^{-14}$	$3{,}1623x10^{-14}$
SS_s	Simülasyon sekans son (s):	
	$1{,}8302x10^{-10}$	$5{,}4075x10^{-10}$
ED_o	Elektron yoğunluğu, sekans-başlangıç ($1/m^3$)	
	$1{,}00x10^{16}$	$1{,}00x10^{16}$
ED_s	Elektron yoğunluğu, sekans-son ($1/m^3$)	
	$4{,}98x10^{19}$	$1{,}14x10^{20}$
ECD_s	Elektron akım yoğunluğu, sekans-son (A/m^2)	
	$3{,}29x10^{5}$	$1{,}08x10^{5}$
EPD_s	Elektrik potansiyel dağılımı, sekans-son (VDC)	
	455	547
CPD_s	Kapasitif güç depolama, sekans-son (W/m^3)	
	$3{,}63x10^{11}$	$8{,}32x10^{11}$

Çizelge 3.10. simülasyon sonuç verilerine göre;

1) InGaAsP-Ar/H_2 mikroplazma sistemindeki elektron yoğunluğu (ED_s) değeri genlik olarak, InGaAsP-Ar mikroplazma sisteminden yaklaşık iki kat yüksektir.
2) InGaAsP-Ar/H_2 mikroplazma sistemindeki kapasitif güç depolama (CPD_s) değeri genlik olarak, InGaAsP-Ar mikroplazma sisteminden yaklaşık iki kat yüksektir.
3) InGaAsP-Ar/H_2 mikroplazma sistemindeki elektrik potansiyel dağılım (EPD_s) değeri genlik olarak, InGaAsP-Ar mikroplazma sisteminden yaklaşık 92 VDC daha yüksektir.

Gaz ortamının elektriksel kırılım gerilimi (V_{BD}); gaz basıncı (P, Torr) ve anot-katot elektrotlar arası deşarj aralığı (d, cm) çarpımı P.d (Torr.cm) Paschen çarpımı ifadesi ile tanımlanmıştır.

Şekil 3.75'te SİM-5 hücre modelinde kullanılan argon/hidrojen plazma reaktörünün çalışma bölgesi Paschen eğrisi üzerinde P.d = 2,5 Torr.cm çarpımı ile gösterilmiştir.



Şekil 3.75. SİM-5 Ar/H_2-Paschen çalışma bölgesi (2,5 Torr.cm)

GDSµP sisteminin tekli Ar ve ikili Ar/H_2 (70:30) gaz deşarj modelleri için elde edilen sayısal simülasyon verilerine göre aşağıdaki karşılaştırmalı sonuçlar özetlenmiştir:

- InGaAsP-Ar/H_2 sistemi, Ar sisteminden daha uzun sürede kararlı hale geldi (SS_s).
- InGaAsP-Ar/H_2 sistemi için sekans son tepe elektron yoğunluk (ED_s) değeri, Ar sisteminden yaklaşık 2 kat yüksek olduğu görüldü.
- InGaAsP-Ar/H_2 sistemi için sekans son tepe elektron akım yoğunluk (ECD_s) değeri, Ar sistemi ile yaklaşık aynı olduğu görüldü.
- InGaAsP-Ar/H_2 sistemi için sekans son kapasitif güç depolama (CPD_s) tepe değerinin, Ar sisteminden yaklaşık 2 kat yüksek olduğu görüldü.
- InGaAsP-Ar/H_2 sistemi için sekans son elektrik potansiyel dağılımı (EPD_s) tepe noktasının (547 VDC), Ar sisteminden (455 VDC) biraz yüksek olduğu görüldü.

SİM-5 simülasyon çalışmamıza temel bilgi oluşturacak bir çalışmamız; DC/AC -beslemeli GaAs-Ar mikroplazma sistemi üzerinde elektriksel boşalma parametrelerinin deneysel ve sayısal analiz yöntemleri ile incelenmesi konusunda yapılmıştır [77, 78].

SİM-5 kodlu simülasyon sayısal analiz çalışmamızda diğer SİM kodlu çalışmalardan farklı olarak; mikroplazma reaktör gaz ortamda mevcut başlangıç elektron yoğunluk değeri hesaplamalarda $1{,}0x10^{16}$ $(1/m^3)$ alındı. Buradaki amaç; daha düşük seviyedeki başlangıç elektron yoğunluk değerine sahip reaktör gaz ortamda GDSμP sisteminin uzay-zamansal deşarj parametrelerini ve sistemin normal glow deşarj rejimine geçiş sürecini eliptik geometriye sahip farklı bir hücre yapısında incelemektir.

InGaAsP-Ar/H_2 mikroplazma reaktör sisteminin, yakın/kısa dalga kızılötesi (NIR/SWIR) bölgede düşük enerjili ve az sayıda foton ışıması yapan kaynakların görüntülerinin verimli ve hızlı bir şekilde görünür (VIS) bölgede yüksek enerjili fotonlara dönüşümü için özel olarak tasarlanabileceği sayısal simülasyon veri analizlerinden anlaşılmaktadır.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Model tasarım parametrelerinde tanımlanmış bir mikro-boşalma aralığı (d) ve gaz basıncı (P) için yarıiletken-mikroplazma aygıtın güvenli ve stabil çalışma bölgesinin, Paschen eğrisi üzerinde hassas bir şekilde kontrol edilebileceği görüldü.

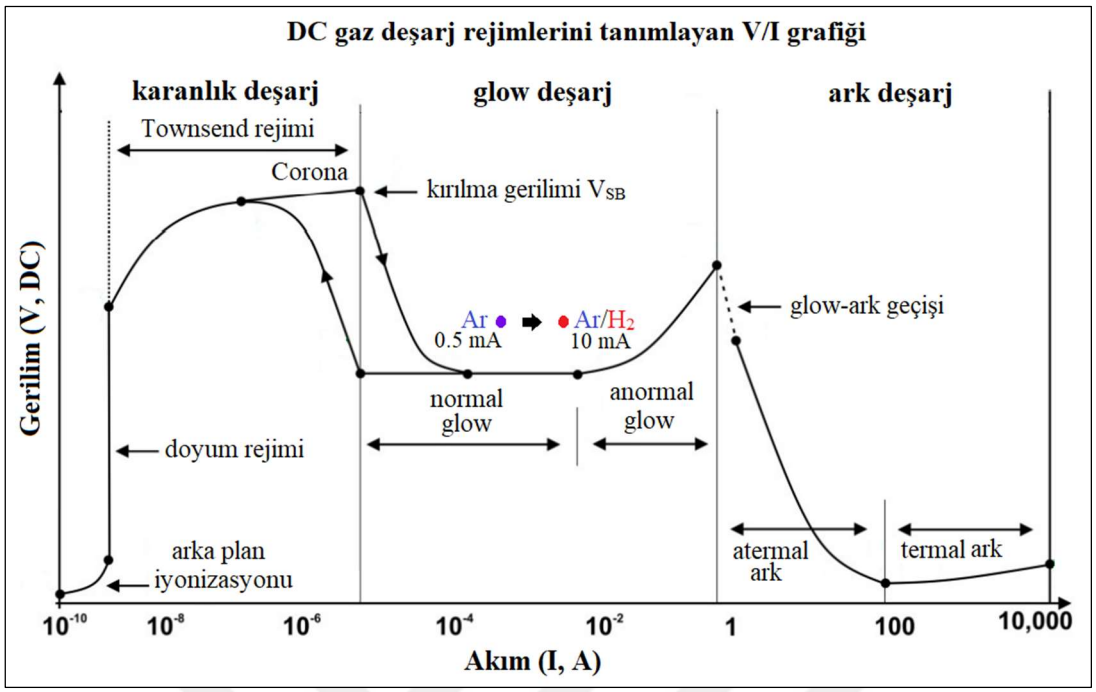
GDSμP sisteminin, kızılötesi ışığa hassasiyeti, spektral tepkisi, kızılötesi-görünür dalga boyu dönüştürme performans ve verimliliği gibi temel özelliklerinin geliştirilebileceği anlaşıldı.

Katot elektron emisyon yüzey morfolojisinin, uygulamaya özel tasarlanacak yarıiletken-mikroplazma sisteminin elektro-optik çalışma parametrelerinin kontrol edilmesinde etkin olarak kullanılabileceği elde edilen sayısal analiz verilerinden anlaşıldı.

Mikroplazma reaktör odacığında kullanılan proses gazın (argon) belli oranlarda hidrojen ile karışımı sonucu elde edilen modellemelerde, uygulamaya özel tasarlanacak olan yarıiletken-mikroplazma sisteminin elektro-optik çalışma parametrelerinin kontrol edilebildiği ve deşarj parametreleri üzerinde etkili olduğu sayısal analiz verilerinden anlaşıldı.

Ar mikroplazma reaktör hücresine belli oranlarda H_2 ilavesi ile elde edilen Ar/H_2 ikili gaz karışım ortamında sistemin elektriksel boşalma parametrelerinin (ED, ECD, CPD, EPD) boşalma aralığı (d) boyunca sergilediği üç boyutlu uzay-zamansal dağılım morfolojisinin, tepe lokasyonlarının ve genliklerinin, normal glow boşalma rejimindeki I/V karakteristik çalışma noktasının hassas kontrol edilebileceği anlaşıldı.

Şekil 4.1'de DC gaz rejimlerini tanımlayan V/I grafiği üzerinde argon ve argon/hidrojen mikroplazma sistemlerinin sayısal simülasyon analiz verilerinden elde edilen plazma akımlarının değerleri gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Ar ve Ar/H_2 sistemlerin DC normal glow deşarj çalışma bölgesi (V/I)

Elde ettiğimiz hesaplamalı sayısal simülasyon verilerine göre; argon sisteminde çalışan mikroplazma modelimizde boşalma akımı yaklaşık 0,5 mA oluşurken, argon/hidrojen sisteminde çalışan mikroplazma modellerimizde 10 mA seviyesine kadar oluşabilmektedir. Deşarj akımın tepe noktası gaz sisteminin basıncına bağlı olarak değişmektedir. Artan gaz basıncı ile reaktör boşalma akımı da artmaktadır. Yarıiletken-mikroplazma modüllerinin normal glow boşalma rejimi içinde sınırlı çalışması yarıiletken fotokatot malzemenin hasar görmemesi için elzemdir. Bundan dolayı, reaktör boşalma akımının 1,0 – 10 mA skalasında sınırlı kalmasına dikkat edildi. Reaktör deşarj akımının ark rejimine geçiş noktasına doğru kayması durumunda katot elektron emisyon yüzeyinde sıcak spot bölgeleri gelişmekte ve neticede katot elektron emisyon etkin yüzey alanı hücre kullanım yoğunluğuna bağlı olarak giderek küçülmekte ve reaktörün kapasitif güç depolama kapasitesi azalmaktadır. Süreç içerisinde, hücrenin çalışma performansının düşmesi ile kullanım ömrü de azalmaktadır. Özellikle kritik endüstriyel uygulamalarda, uzay-havacılık ve savunma sanayi uygulamalarında aygıt çalışma performansı ve çalışma ömrü çok önemli bir kalite faktörüdür. Bundan dolayı, tez çalışmamız kapsamında elde edilen öncül sayısal simülasyon verileri yardımıyla, mikroplazma reaktörünün kısmen de olsa prognostik analizi yapılabilir ve tasarım sınır şartları tanımlanabilir.

Uygulama gereksinimlerine göre tasarlanmış bir IR-VIS GDSµP aygıt ile düşük enerjili ve az sayıda kızılötesi ışık fotonları doğrudan algılanabilir ve verimli bir şekilde yüksek enerjili ve çok sayıda görünür ışık fotonlarına dönüştürülebilir.

Tez çalışmamız kapsamında incelenen Grup III-V ve II-VI bileşik yarıiletken malzemeler ile modellenen katot elektrotlar ile kuple Ar/H_2 gaz deşarj mikroplazma sistemlerinin pek çok endüstriyel ve savunma sanayi uygulamalarında potansiyel kullanım alanlarına yönelik aygıt tasarım ve üretiminde kullanılabileceği önerilmiştir.

Yarıiletken-mikroplazma sistem simülasyon modellerinin çeşitlendirilmesi ve sayısal veri tabanının geliştirilmesi ile kızılötesi algılama ve görüntü çevirme uygulama alanlarına yönelik yerli ve milli GDSµP aygıtları tasarlanabilir ve proje destekli prototip geliştirme çalışmaları yapılabilir.

Farklı bileşik yarıiletken malzeme tabanlı mikroplazma sistemlerinin tasarım, modelleme, sayısal simülasyon ve analiz çalışmalarımız devam etmektedir. Uzun dalga boyu (LWIR) kızılötesi spektral bölgede çalışabilen bant aralığı ayarlanabilir civa kadmiyum tellür ($Hg_{1-x}Cd_xTe$) bileşik yarıiletken fotokatot ve Ar/H_2 gaz deşarj reaktöründen oluşan GDSµP modelinin atmosfer ve atmosfer üstü basınçlardaki davranışı sayısal analiz yöntemiyle incelendi [79].

KAYNAKLAR

1. Bonizzoni, G., Vassallo, E. (2002). Plasma physics and technology; industrial applications. *Vacuum,* 64(3-4), 327-336.

2. Turner, M. (2016). *Physics of Cold Plasma-Cold Plasma in Food and Agriculture: Fundamentals and Applications*. Elsevier. 17-51.

3. T von Woedtke, Laroussi M. and Gherardi M. (2002). Foundations of plasmas for medical applications. *Plasma Sources Science and Technology*, 31(5), 054002.

4. Laroussi, M. (2015). Low-temperature plasma jet for biomedical applications: A review. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43(3), 703–712.

5. Choi, E. H., Kaushik, N. K., Hong, Y. J., Lim, J. S., Choi, J. S., and Han, I. (2022). Plasma bioscience for medicine, agriculture and hygiene applications. *Journal of the Korean Physical Society*, 80, 817–851.

6. Zimmermann, S., Haase, M., Lang, N., Röpcke, J., Schulz, S.E., Otto, T. (2018). The role of plasma analytics in leading-edge semiconductor technologies. *Contributions to Plasma Physics,* 58(5), 367-376.

7. Schoenbach, K.H., Becker, K. (2016). 20 years of microplasma research: A status report. *The European Physical Journal D*, 70, 29.

8. Chiang, W.-H., Mariotti, D., Sankaran, R.M., Eden, J.G., and Ostrikov, K. (2020). Microplasmas for advanced materials and devices. *Advanced Materials,* 32(18), 1905508.

9. Tabib-Azar, M., Pai, P. (2017). Microplasma field effect transistors. *Micromachines*, 8(4), 117.

10. Baranov, O. O., Xu, S., Xu, L., Huang, S., Lim, J. W. M., Cvelbar U., Levchenko I., and Bazaka, K. (2018). Miniaturized plasma sources: Can technological solutions help electric micropropulsion? *IEEE Transactions on Plasma Science,* 46(2), 230–238.

11. Shivkumar, G., Qiao, L., and Alexeenko, A. A. (2019). Plasma-flow interactions in field-emission discharges with applications in microcombustion. *Journal of Physics D: Applied Physics,* 52, 384001.

12. Takahashi, T., Mori, D., Kawanabe, T., Takao, Y., Eriguchi, K., and Ono, K. (2019). Microplasma thruster powered by X-band microwaves. *Journal of Applied Physics,* 125, 083301.

13. Liangliang, L., and Wang, Q. (2015). Microplasma: A New Generation of Technology for Functional Nanomaterial Synthesis. *Plasma Chemistry and Plasma Processing,* 35, 925–962.

14. Kurt, H.Y., Inalöz, A., Salamov, B.G. (2010). Study of non-thermal plasma discharge in semiconductor gas discharge electronic devices. *Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications,* 4(2), 205-210.

15. Kurt, H.H., Koc, E., Salamov, B.G. (2010). Atmospheric Pressure DC Glow Discharge in Semiconductor Gas Discharge Electronic Devices. *IEEE Transactions on Plasma Science,* 38(2), 137-141.

16. Mijović, S. and Vučeljić, Mira. (2013). Determination of Electron Energy Distribution Function from the Intensity of Spectral Lines by Tikhonov Regularization Method in Low Pressure Helium Plasma. *Romanian Reports in Physics,* 65(4), 1384–1389.

17. Salamov, B.G., Kurt, H. H. (2020). Ar-driven gas discharge system based on dielectric zeolite material. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (JOM)*, 72(10), 1-7.

18. Kurt, H.Y., Salamov, B.G., and Mammadov, T.S. (2005). Electrical instability in a semiconductor gas discharge system. *Crystal Research and Technology*, 40(12), 1160-1164.

19. Sadiq, Y., Kurt, H.Y., Albarzanji, A.O., Alekperov, S.D, Salamov, B.G. (2009). Transport properties in semiconductor-gas discharge electronic devices. *Solid-State Electronics*, 53(9), 1009-1015.

20. Kurt, H.H., Tanrıverdi, E. (2017). The Features of GaAs and GaP Semiconductor Cathodes in an Infrared Converter System. *Journal of Electronic Materials,* 46(7), 4024–4033.

21. Kurt, H.H. (2014). An Optical Method for the Quality Exploration of a GaAs Material. *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation,* 2(2), 87-98.

22. Kurt, H.H. (2018). Exploration of gas discharges with GaAs, GaP and ZnSe electrodes under atmospheric pressure. *Journal of Electronic Materials,* 47, 4444-4454.

23. Kurt, H.Y., Kalkan, G., Özer, M., Tanrıverdi, E., Yigit, D. (2014). The Effect of the Oxidation on GaAs Semiconductor Surface to the System Characteristics in a Double-Gapped Plasma Cell. *Journal of Polytechnic,* 17(4), 161-165.

24. Kurt, H.H., Tanrıverdi, E. (2017). Electrical properties of ZnS and ZnSe semiconductors in a plasma-semiconductor system. *Journal of Electronic Materials,* 46(7), 3965-3975.

25. Kurt, H.H. (2018). Exploration of the infrared sensitivity for a ZnSe electrode of an IR image converter. *Journal of Electronic Materials,* 47(8), 4486-4492.

26. Kurt, H.H., Tanrıverdi, E., Salamov, B.G. (2019). Optical and electrical properties of CdS material in a microplasma cell under IR stimulation. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (JOM),* 71(2), 644-650.

27. Kurt, H.H., Salamov, B.G. (2020). Breakdown phenomenon and electrical process in a microplasma system with InP electrode. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (JOM),* 72(2), 1-7.

28. Fu, Y., Zhang, P., Verboncoeur, J.P., and Wang, X. (2020). Electrical breakdown from macro to micro/nano scales: a tutorial and a review of the state of the art. *Plasma Research Express,* 2(1), 013001.

29. Garner, A.L., Meng, G., Fu, Y., Loveless, A.M., Brayfield II, R.S., Darr, A.M. (2020). Transitions between electron emission and gas breakdown mechanisms across length and pressure scales. *Journal of Applied Physics,* 128(21), 210903.

30. Go, D.B. and Venkattraman, A. (2014). Microscale gas breakdown: ion-enhanced field emission and the modified Paschen's curve. *Journal of Physics D: Applied Physics,* 47(50), 503001.

31. Garner, A.L., Loveless, A.M., Dahal, J.N., Venkattraman, A. (2020). A tutorial on theoretical and computational techniques for gas breakdown in microscale gaps. *IEEE Transactions on Plasma Science,* 48(4), 808–824.

32. Somayajula, S.K., Sriram, A.T., Shelar, V.M. (2020). Study of argon and xenon gas properties on DC-glow discharge plasma. *Journal of Physics Conference Series,* 1706(1), 012030.

33. Ikhmayies, S.J., (Editor), Kurt, H.H. (Editor). (2021). *Advances in Optoelectronic Materials. Advances in Material Research and Technology*. Springer; 1st ed. 2021 edition.

34. Niklaus, F., Vieider, C., and Jakobsen, H. (2008). MEMS-based uncooled infrared bolometer arrays: a review. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering,* 6838.

35. Rogalski, A. (2011). Recent progress in infrared detector technologies. *Infrared Physics & Technology,* 54(3), 136-154.

36. Norton, P.R. (1999). Infrared detectors in the next millennium. *Proceedings of the SPIE*, 3698, 652-665.

37. Yu, P. Y., Cardona, M. (2010). *Fundamentals of Semiconductors: Physics and Materials Properties. Graduate Texts in Physics*. Fourth Edition, Springer.

38. Butson, B.R., Boos, J.B., Ancona, M.G., Papanicolaou, N.A., Cooke, G.A., Kheyrandish, H. (2007). InAlSb/InAs/AlGaSb Quantum Well Heterostructures for High-Electron-Mobility Transistors. *Journal of Electronic Materials,* 36(2), 99–104.

39. Bennett, B.R., Khan, S.A., Boos, J.B., Papanicolaou, N.A., Kuznetsov, V.V. (2010). AlGaSb Buffer Layers for Sb-Based Transistors. *Journal of Electronic Materials,* 39(10), 2196–2202.

40. Butson, J.D., Narangari, P.R., Lysevych, M., Wong-Leung, Wan, Karuturi, S.K., Tan, H.H., Jagadish, C. (2019). InGaAsP as a Promising Narrow Band Gap Semiconductor for Photoelectrochemical Water Splitting. *ACS Applied Materials & Interfaces,* 11(28), 25236-25242.

41. Morkoc, B.H., Strite, S., Gao, G.B., Lin, M.E., Sverdlov, B., and Burns, M. (1994). Large-band-gap SiC, III-V nitride, and II-VI ZnSe-based semiconductor device technologies. *Journal of Applied Physics,* 76(3), 1363-1398.

42. Donald, D.H., Hendrik, C.S., Setumo, V.M., Lehlohonolo, F.K. (2022). Zinc selenide semiconductor: synthesis, properties and applications. *Nanoscale Compound Semiconductors and their Optoelectronics Applications,* 67-84.

43. Nweze, C.I., Ekpunobi, A.J. (2014). Electrodeposition of zinc selenide films on different substrates and its characterization. *International Journal of Scientific & Technology Research,* 3(9), 201-203.

44. Yan, L., Woollam, J.A., Franke, E. (2002). Oxygen plasma effects on optical properties of ZnSe films. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films,* 20(3), 693-701.

45. Banthí-Barcenas, J.C., Sutara, F., and Hernández-Calderón, I. (2018). *Design of a quantum well based on a ZnCdSe/ZnTe type II heterostructure confined type I within ZnSe barriers*. 8th International Conference on Low Dimensional Structures and Devices (LDSD 2016), AIP Conference Proceedings, 1934(1), 030001.

46. Tournié, E., Bartolome, L.M., Calvo, M.R., Loghmari, Z., Díaz-Thomas, D.A., Teissier, R., Baranov, A.N., Cerutti, L., and Rodriguez, J-B. (2022). Mid-infrared III–V semiconductor lasers epitaxially grown on Si substrates. *Light: Science & Applications,* 11(1), 165.

47. Vurgaftman, I., Meyer, J.R., Ram-Mohan, L.R. (2001). Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics,* 89(11), 5815–5875.

48. Dutta, P.S., Bhat, H.L., Kumar, V. (1997). The physics and technology of gallium antimonide: an emerging optoelectronic material. *Journal of Applied Physics,* 81(9), 5821–5870.

49. Wang, Y., Li, J., Zhang, J., Sha, W. (2023). Optoelectronic Properties of In0.87Ga0.13As0.25P0.75(001) β2(2×4) Surface: A First-Principles Study. *Materials,* 16(7), 2834.

50. Othman, M., Kasap, E., Korozlu, N. (2010). Ab-initio investigation of structural, electronic and optical properties of $In_xGa_{1-x}As$, $GaAs_{1-y}P_y$ ternary and $In_xGa_{1-x}As_{1-y}P_y$ quaternary semiconductor alloys. *Journal of Alloys and Compounds,* 496(1), 226–233.

51. Wang, H., Linghu, J., Zou, P., Wang, X., Shen, H., and Hai, B. (2023). Theoretical study on the photoemission performance of a transmission mode $In_{0.15}Ga_{0.85}As$ photocathode in the near-infrared region. *Molecules,* 28(13), 5262.

52. Wang, Z., Zhang, Y., Li, S., Tang, S., Zhang, J., Qian, Y., Shi, F., Jiao, G., Cheng, H., and Zeng, Y. (2023). Enhancement of near-infrared response of InGaAs photocathode through interaction of 1064 nm light with activated surface. *Applied Surface Science,* 619, 156760.

53. Guo, J., Zhao, J., Yang, M. (2020). Interface engineering of InGaAs/InP layer for photocathode. *Optik*, 212, 164738.

54. Junkai, X., Xiangyan, X., Jinshou, T., Duan, L., Dandan, H. (2016). Numerical simulation study on quantum efficiency characteristics of InP/InGaAs/InP infrared photocathode. *Infrared Technology and Applications, and Robot Sensing and Advanced Control,* 101573C.

55. Pearsall, T.P., Hopson, R.W. (1978). Growth and characterization of lattice-matched epitaxial films of $Ga_xIn_{1-x}As$/InP by liquid-phase epitaxy. *Journal of Electronic Materials*, 7, 133–146.

56. Adachi, S. (1989). Optical dispersion relations for GaP, GaAs, GaSb, InP, InAs, InSb, $Al_xGa_{1-x}As$, and $In_{1-x}Ga_xAs_yP_{1-y}$. *Journal of Applied Physics*, 66(12), 6030–6040.

57. Fu, Y., Zhang, P., Krek, J., and Verboncoeur, J. P. (2019). Gas breakdown and its scaling law in microgaps with multiple concentric cathode protrusions. *Applied Physics Letters*, 114, 014102.

58. Naresh, C. Das. (2011). Tunable infrared plasmonic absorption by metallic nanoparticles. *Journal of Applied Physics,* 110, 046101.

59. Zhang, J., Wang, Y., Li, D., Sun, Y. (2022). Engineering Surface Plasmons in Metal/Nonmetal Structures for Highly Desirable Plasmonic Photodetectors. *ACS Materials Letters,* 4(2), 343−355.

60. Brayfield, II R.S., Fairbanks, A.J., Loveless, A.M., Gao, S., Dhanabal, A., Li, W., Darr, C., Wu, W., and Garner A.L. (2019). The impact of cathode surface roughness and multiple breakdown events on microscale gas breakdown at atmospheric pressure. *Journal of Applied Physics,* 125, 203302.

61. Malayter, J. R. and Garner, A. L. (2020). Theoretical assessment of surface waviness on work function. *AIP Advances,* 10(9), 095110.

62. Ongun, E. (2012). *Examination of optical and metamaterial behaviours exhibited by sculptured thin-films*. Master Thesis. İstanbul Technical University Materials Engineering Program.

63. Uddin, S., Vijayan, C., Jatindra K. R. (2020). Optical modelling of photonic and geometrical structures used for light management in thin-film solar cells. *Materials Today: Proceedings,* 39, 1974 – 1977.

64. De Jong, M.M., Sonneveld, P.J., Baggerman, J., Van Rijn, C.J.M., Jatindra K.R., Schropp, R.E.I. (2014). Utilization of geometric light trapping in thin film silicon solar cells: Simulations and experiments. *Progress in Photovoltaics Research and Applications,* 22(5), 540 – 547.

65. Bülbül, M.M., Kurt, H.H., Salamov B. (2002). *Surface behaviour of plasma etched photodetector in a planar gas discharge image converter*. 7th Int'l Conference on Nanometer-Scale Science and Technology (ECOSS-21), Malmö, Sweden.

66. Alaa, M. Abd-Elnaiem, Hakamy, A. (2022). Influence of annealing temperature on structural, electrical, and optical properties of 80 nm thick indium-doped tin oxide on borofloat glass. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics,* 33, 23293–23305.

67. Vossen, J. L. (1978). *Thin Film Processes*. Academic Press, INC., New York.

68. Ongun, E., Yücel (Kurt), H.H., Utaş, S. (2024). *Investigation of direct current micro glow discharge plasma in the modified zinc selenide-argon system*. 8th International Conference on Innovative Studies of Contemporary Sciences. Tokyo, Japan.

69. Ongun, E., Yücel (Kurt), H.H., Utaş, S. (2024). *Modeling and simulation of DC glow discharges in the zinc selenide-argon/hydrogen microplasma system*. 8th International Conference on Innovative Studies of Contemporary Sciences. Tokyo, Japan.

70. Ongun, E., Utaş, S., Yücel (Kurt), H.H. (2023). *ZnSe-Ar/H_2 yarıiletken-gaz deşarj mikro plazma sisteminin incelenmesi*: *Modelleme ve simülasyon*. Yoğun Madde Fiziği Ankara Toplantısı.

71. Ongun, E., Utaş, S., Yücel (Kurt), H.H. (2024). *An investigation of DC -driven micro plasma system with ZnSe coupled Ar/H_2 gas discharge medium at sub atmospheric pressure*. 15th China to Adriatic Turkish World International Scientific Research Congress. ANAS Central Library of Science & IKSAD Institute. Baku, Azerbaijan.

72. Ongun, E., Yücel, H.H., Utaş, S. (2024). DC-driven sub atmospheric glow discharges in the infrared-stimulated. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics,* 35, 655-669.

73. Ongun, E., Yücel, H.H. (2024). Spatiotemporal Modeling and Simulation of DC Microplasma Glow Discharges in the ZnSe-Ar/H_2 System. *Inspiring Technologies and Innovations,* 3(1), 1-8.

74. Ongun, E., Utaş, S., Yücel (Kurt), H.H., Hançerlioğulları, A. (2023). *The investigation of spatiotemporal dynamics of planar DC field emission-driven gas discharge-semiconductor microplasma system (GDSμPS)*. Turkish Physical Society 39th International Physics Congress. Bodrum Türkiye.

75. Ongun, E., Utaş, S., Yücel (Kurt), H.H. (2023). *Modeling and simulation of DC -driven AlGaSb coupled glow discharge micro plasmas at sub atmospheric pressure*. 11th International Mardin Artuklu Scientific Researches Conference. Mardin, Türkiye.

76. Ongun, E., Utaş, S., Yücel (Kurt), H.H., Hançerlioğulları, A. (2024). Modeling and Simulation of DC Glow Discharges in the AlGaSb -coupled Ar/H_2 Hybrid Micro Plasma System. *Journal of Polytechnic*, 1-1. https://doi.org/10.2339/politeknik.1406036.

77. Kurt, H.Y., Sadiq, Y., Salamov, B.G. (2008). Nonlinear electrical characteristics of semi-insulating GaAs. *Physica status solidi (a)*, 205(2), 321-329.

78. Yücel, H.H., Utaş, S., Ongun, E. (2024). The Study of DC- and AC -Driven GaAs-Coupled Gas Discharge Micro Plasma Systems: Modeling and Simulation. *Journal of Electronic Materials,* 53(6), 1-17.

79. Yücel, H.H., Utaş, S., Ongun, E. (2024). The investigation of direct current microdischarges in HgCdTe -coupled Ar/H_2 gas medium at atmospheric and hyper-atmospheric pressures. *Optoelectronics and Advanced Materials–Rapid Communications,* 18(5-6), 296-304.



Gazili olmak ayrıcalıktır