

**T.C.  
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İLERLEYEN DALGA TÜPLERİ KULLANILARAK YÜKSEK  
FREKANSLI MİKRODALGALARIN OLUŞTURULMASI**

**Ferhat BOZDUMAN**

**Danışman  
Prof. Dr. Lütfi ÖKSÜZ**

**DOKTORA TEZİ  
FİZİK ANABİLİM DALI  
ISPARTA - 2019**

© 2019 [Ferhat BOZDUMAN]

## TEZ ONAYI

Ferhat BOZDUMAN tarafından hazırlanan "İlerleyen Dalga Tüpleri Kullanılarak Yüksek Frekanslı Mikrodalgaların Oluşturulması" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri üyeleri önünde Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Fizik Anabilim Dalı**'nda **DOKTORA TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

**Danışman**

**Prof. Dr. Lütfi ÖKSÜZ**  
Süleyman Demirel Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Ayşegül UYGUN ÖKSÜZ**  
Süleyman Demirel Üniversitesi



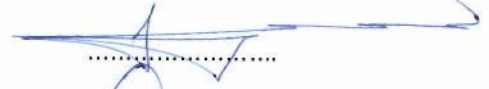
**Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Songül ŞEN GÜRSOY**  
Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Prof. Dr. Seyfettin ÇAKMAK**  
Süleyman Demirel Üniversitesi



**Jüri Üyesi**

**Doç. Dr. Ali GÜLEÇ**  
Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



**Enstitü Müdürü**

**Doç. Dr. Şule Sultan UĞUR**

.....

## **TAAHHÜTNAME**

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

**Ferhat BOZDUMAN**





## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
İÇİNDEKİLER.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ.....	4
2.1. İlerleyen Dalga Tüplerinin Teorisi.....	4
2.2. Elektron Tabancası.....	5
2.3. Elektron Demeti Kontrol Teknikleri.....	11
2.4. Elektron Demetinin Odaklanması.....	13
2.5. Yavaş Dalga Yapısı ve RF Sinyalinin Güçlendirilmesi.....	24
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	55
3.1. Materyal.....	55
3.2. Yöntem.....	66
4. ARAŞTIRMA BULGULARI.....	69
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	72
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	79

## ÖZET

Doktora Tezi

### İLERLEYEN DALGA TÜPLERİ KULLANILARAK YÜKSEK FREKANSLI MİKRODALGALARIN OLUŞTURULMASI

Ferhat BOZDUMAN

Süleyman Demirel Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Lütfi ÖKSÜZ

Bu tez çalışmasında doğrusal vakum tüpleri sınıfında bulunan ilerleyen dalga tüpünün (TWT) çalışma prensipleri bilgisayar simülasyonlarıyla incelenip dizayn edilmiş ilerleyen dalga tüpünün üretimi gerçekleştirildi. Mikrodalga yükselteçleri olarak bilinen ilerleyen dalga tüpleri giriş kısmına uygulanan radyo frekans (RF) sinyalini, belirli sınırlar çerçevesinde güçlendirmektedir. Bunun yanında, helis tipi yavaş dalga yapısına sahip ilerleyen dalga tüpü üzerinde çalışıldı. Elektron demetini oluşturmak için BaO tipi dispenser katot kullanıldı ve katodun çalışma parametreleri belirlendi. Kolektör olarak tek kademeli yapı kullanıldı. Çalışma frekansı değeri olarak C bandına karşılık gelen 4-5 GHz aralığı belirlendi. Çıkış sinyalinin gücünü ölçmek için güç metre kullanıldı. Giriş portuna 15 mW gücünde sinyal uygulandı ve çıkış portundaki sinyal gücü 1 W olarak ölçüldü.

**Anahtar Kelimeler:** Yavaş dalga yapısı, helis, ilerleyen dalga tüpü, mikrodalga, rf, katot, kolektör, simülasyon, yükselteç.

2019, 94 sayfa

## **ABSTRACT**

**Ph. D. Thesis**

### **CREATING HIGH FREQUENCY MICROWAVE BY USING TRAVELLING WAVE TUBES**

**Ferhat BOZDUMAN**

**Süleyman Demirel University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Physics**

**Supervisor: Prof. Dr. Lütfi ÖKSÜZ**

In this study, working principles of travelling wave tubes (TWT) in the class of linear electron beam tube are studied. The travelling wave tube model which is simulated with multi-core computer in the laboratory environment is produced. Travelling wave tubes, known as microwave amplifiers, strengthen the radio frequency (RF) signal which is applied to the input section under certain boundaries. Moreover, a travelling wave tube with helical type slow wave structure was studied. A BaO type dispenser cathode was used to form the electron beam and the operating parameters of the cathode were determined. Single stage structure was used as a collector. As a value of operating frequency which corresponds to 4-5 GHz interval was specified. This range is defined as the C band in microwave language. Power meter was used to measure the power of the output signal. 15 mW power signal was implemented in the input port and the power at the output port was measured as 1 W.

**Keywords:** Slow wave structure, helix, travelling wave tube, microwave, rf, cathode, collector, simulation, amplifier.

**2019, 94 pages**

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında beni motive eden, araştırma esnasında karşılaşılan çeşitli zorluklara karşı beni çözüme yakınlaştıran, maddi ve manevi anlamda beni destekleyen, deney çalışmaları için her türlü laboratuvar ortamını ve koşulları sağlayan değerli danışman hocam Prof. Dr. Lütfi ÖKSÜZ'e, deneysel çalışmalarda fikir ve yardımlarını esirgemeyen biyomedikal mühendisliği bölüm başkanı Doç. Dr. Ali GÜLEÇ'e, simülasyon, modelleme, literatür bilgisi edinme ve deneysel çalışma aşamalarında desteğini sürekli sağlayıp esirgemeyen değerli arkadaşım Necati HAYTURAL'a, deneysel çalışmalarda ve üretim aşamasında her türlü fikir, destek, teknik bilgi ve motivasyonu bana aşılayan değerli arkadaşım Emre UYGUN'a sonsuz teşekkür ederim.

Tezimin gerçekleşmesinde 1140075 numaralı proje ile maddi destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Tezimin deneysel aşamasında laboratuvar desteğini eksiksiz bir şekilde aldığım PLAZMATEK şirketine teşekkür ederim.

Tezimin her türlü aşamasında beni her anlamda yalnız bırakmayan çekirdek aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ferhat BOZDUMAN  
ISPARTA, 2019

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Eski ve yeni mikrodalga frekans bandlarının gösterilmesi.....	1
Şekil 1.2. Vakum cihazları ile katı hal cihazlarının uygulama aralıkları.....	2
Şekil 2.1. Helis tipi ilerleyen dalga tüpünün bileşenleri.....	4
Şekil 2.2. Termiyonik emisyonun gerçekleşmesi .....	6
Şekil 2.3. Katot yapısının içeriğinin ölçeklendirilmesi .....	6
Şekil 2.4. Termiyonik katot emisyonunun tarihsel perspektifi .....	8
Şekil 2.5. Katot ısıtma yöntemleri.....	8
Şekil 2.6. Yayıcı katotlar için ısıtıcı düzenekleri .....	9
Şekil 2.7. Pierce elektron tabancasının çalışma prensibi .....	10
Şekil 2.8. Yayıcı tip katotlu elektron tabancaları.....	11
Şekil 2.9. Elektron demeti akımını kontrol etme yöntemleri.....	12
Şekil 2.10. Pierce elektron tabancalarında kullanılan kontrol ızgaraları .....	12
Şekil 2.11. Uzay şarjı kuvvetlerinin ve odaklama kuvvetlerinin elektron demeti üzerindeki etkileri .....	13
Şekil 2.12. Manyetik elektron lensi .....	14
Şekil 2.13. Eşit aralıklı lens sisteminin odaklama mekanizması.....	14
Şekil 2.14. Brillouin akışını başlatmak için elektron tabancası ve kutup kapağının konfigürasyonu .....	17
Şekil 2.15. Brillouin akışı için giriş koşulları.....	17
Şekil 2.16. Elektron demetinin akım yoğunluğu ile demet çapı arasındaki değişim .....	18
Şekil 2.17. Sınırlandırılmış akışı başlatmak için kullanılan tasarım .....	19
Şekil 2.18. Brillouin akışı için odaklama yapısının girişindeki manyetik alanın yapılandırılması.....	20
Şekil 2.19. Rotasyon oranları ile sınırlama faktörü arasındaki ilişkinin grafik ile gösterilmesi.....	21
Şekil 2.20. Bir elektron demetinin kalıcı mıknatıslarla periyodik olarak odaklanması.....	22
Şekil 2.21. TWT sistemlerinde kullanılan AlNiCo serisi halka ve yarım halka mıknatıslar.....	23
Şekil 2.22. Mikrodalga tüplerinde kullanılan selenoid mıknatıs .....	24
Şekil 2.23. Yavaş dalga yapıları.....	25
Şekil 2.24. Helis yapılı bir TWT'de iletim hattının devre olarak karşılığı.....	25
Şekil 2.25. Elektron demetinin etkileşim noktaları ile birlikte helis yavaş dalga yapısının omega-beta (dispersiyon) diyagramı .....	26
Şekil 2.26. Dielektrik destekli helis yapısı .....	27
Şekil 2.27. Bir zemin düzleminin üzerindeki tek telli bir iletim hattı için RF sinyalinin elektrik alan modeli .....	28
Şekil 2.28. RF sinyalinin helis üzerindeki elektrik alan çizgileri .....	28
Şekil 2.29. Helis yapısının geometrik olarak çözümlenmesi .....	29
Şekil 2.30. Helis üzerinde ilerleyen RF dalgasının elektrik alanı.....	31
Şekil 2.31. TWT boyunca sinyalin yükseltilmesi ve elektron kümelenmesi	32
Şekil 2.32. Elektron kümelerinin oluşması.....	32
Şekil 2.33. Seramik destek çubukları ile helis yapısının merkezlenmesi .....	33
Şekil 2.34. Bazı metal ve seramiklerin termal iletkenlikleri.....	34

Şekil 2.35. Tungsten helisli ve APBN destek çubuklu bir TWT sisteminde 1W güç değerinde oluşan sıcaklık dağılımları.....	35
Şekil 2.36. 10 kW çıkış gücünde ve 3-6 GHz bant genişliğindeki bir TWT'nin kesiti .....	35
Şekil 2.37. Şerit tipli bir helis yapısında destek çubuklarının sert lehimleme ile tutturulması.....	36
Şekil 2.38. Çubuk ve blok destekli helis yapılarının karşılaştırılması.....	37
Şekil 2.39. Helis yapısında frekansın artması ile elektrik alandaki değişim	37
Şekil 2.40. Helis yapılı bir TWT'de zayıflatıcı kaplaması.....	38
Şekil 2.41. Elektron demeti yöntemi ile molibdenin destek çubuğu üzerine kaplanması.....	40
Şekil 2.42. Aquadag spreji yöntemi grafit kaplaması.....	40
Şekil 2.43. Molibden ile kaplanmış seramik destek çubukları.....	41
Şekil 2.44. Zayıflatıcı seviyesini ölçmek için kurulan deney düzeneği .....	41
Şekil 2.45. Helis destek çubuğundaki zayıflama deseninin profili.....	42
Şekil 2.46. Dispersiyon kontrol teknikleri.....	43
Şekil 2.47. Frekans fonksiyonları olarak normalleştirilmiş faz hızı ve Pierce hız parametresi.....	43
Şekil 2.48. Bir oktav bant genişliğindeki TWT için helis empedansı .....	44
Şekil 2.49. Düşük empedanslı koaksiyel hattı yüksek empedanslı bir hatta eşleyen konik geçiş.....	45
Şekil 2.50. Helis yapısından koaksiyel hatta geniş bir bant geçişinin yapılması.....	45
Şekil 2.51. Konik bir koaksiyel hat kullanılarak geçiş yapılması .....	46
Şekil 2.52. Helis yapısından koaksiyeye geçiş aşamaları.....	47
Şekil 2.53. TWT sistemlerinde kullanılan bağlantı yapıları .....	47
Şekil 2.54. 6 kademesi olan çok kademeli bir kolektörün şeması.....	48
Şekil 2.55. TWT için çeşitli kolektör konfigürasyonlarının kesit görünümü	49
Şekil 2.56. Thales şirketinin PIC programı kullanılarak 150W Ku-band TWT için simülasyonu yapılan bir elektrostatik 4 kademeli kolektörün birincil yansıyan ve ikincil elektronlarının dağılımı	49
Şekil 2.57. Eşzamanlı durumda sıfır kayıplı ve uzay şarjı olmayan bir TWT'de güç kazancı.....	51
Şekil 2.58. Vakum elektroniği sistemlerinde kullanılan bileşenler ve kullanıldıkları malzemeler .....	53
Şekil 2.59. Mikrodalga vakum tüplerinde kullanılan vakum pompaları.....	53
Şekil 2.60. Frekans bantlarına ve aralıklarına göre mikrodalgaların kullanım alanları .....	54
Şekil 3.1. TWT sisteminin deney düzeneğinin şematik gösterimi .....	55
Şekil 3.2. Katot yüzeyini ısıtmak için kullanılan transformatör yapılı voltaj kontrollü DC güç kaynağı .....	56
Şekil 3.3. Elektron demetini hızlandırmak için kullanılan Edwards 400/800 model yüksek voltaj DC güç kaynağı .....	57
Şekil 3.4. ACME AE-X model helis sarma makinesi ve molibden tel makarası.....	57
Şekil 3.5. Seramik destek çubuklarının bir arada kalmasını sağlamak ve vakum kılıfına yerleştirilmesini sağlamak için kullanılan destek halkalarının üretim aşamaları .....	58

Şekil 3.6. TWT sisteminin yavaş dalga devresinde kullanılan helis yapısı ve seramik (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) destek çubukları .....	59
Şekil 3.7. Alnico halka mıknatıslar kullanılarak periyodik mıknatıs sisteminin oluşturulması ve SMA konektör yuvalarının açılması.....	59
Şekil 3.8. TWT sisteminde kullanılan elektron tabancası .....	60
Şekil 3.9. Fosfor ekran kullanılarak elektron demetinin gözlemlenmesi .....	61
Şekil 3.10. Elektron demetinin akımını ölçmek için kullanılan analog DC ampermetreler .....	61
Şekil 3.11. TWT sisteminin atmosfer koşullarını sağlamak için kullanılan vakum haznesi ve TWT sisteminin montajının yapılması.....	62
Şekil 3.12. Sistemin basınç değerinin ölçülmesi için kullanılan sıcak katot vakum sensörü ve Varian marka yüksek vakum sensörü monitörü.....	62
Şekil 3.13. CST yazılımı kullanılarak elektron demetinin manyetik alan ortamında odaklanma simülasyonunun gösterilmesi.....	63
Şekil 3.14. TWT devresi boyunca elektron kümelenmesinin oluşturulmasının simülasyonu.....	63
Şekil 3.15. TWT devresinin tamamı boyunca kalıcı mıknatıslar ile elektron demetinin odaklanması .....	64
Şekil 3.16. TWT devresinde RF sinyali var iken kalıcı mıknatıslar ile elektron demetinin odaklanmasının yapılması.....	64
Şekil 3.17. Yavaş dalga devresi boyunca elektron demetinin kinetik enerjisinin devrenin konumuna göre değişimi .....	65
Şekil 3.18. Frekans değerlerine göre S parametrelerinin gösterilmesi.....	65
Şekil 3.19. Frekans değerlerine göre voltaj duran dalga oranının (VSWR) simülasyon yöntemi ile gösterilmesi.....	66
Şekil 3.20. Kalıcı periyodik mıknatıs sisteminin oluşturduğu manyetik alanın simülasyonunun yapılması .....	66
Şekil 3.21. RF devresine sinyal uygulamak için kullanılan Wiltron marka 68037B model sinyal jeneratörünün ekran görüntüsü.....	67
Şekil 3.22. RF çıkış portunun sinyal gücünü ölçmek için kullanılan Agilent marka E4418B model güç metre .....	68
Şekil 3.23. RF çıkışının ölçülmesinde kullanılan HP 8481D model güç sensörü ve zayıflatıcı .....	68
Şekil 4.1. CST yazılımı kullanılarak sinyal amplifikasyonunun gözlemlenmesi.....	70
Şekil 4.2. CST yazılımı kullanılarak TDR analizinin yapılması.....	71
Şekil 4.3. Yüzeysel tasarım ile gerçekleştirilen TDR analizi .....	71

## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b>Sayfa</b>
Çizelge 1.1. Vakum cihazlarının sınıflandırılması.....	3
Çizelge 2.1. Bazı elementlerin eV cinsinden iş fonksiyonlarının gösterilmesi.....	7
Çizelge 4.1. Laboratuvar ortamında kurulan TWT sisteminin deneysel parametreleri ve sonuçları.....	69

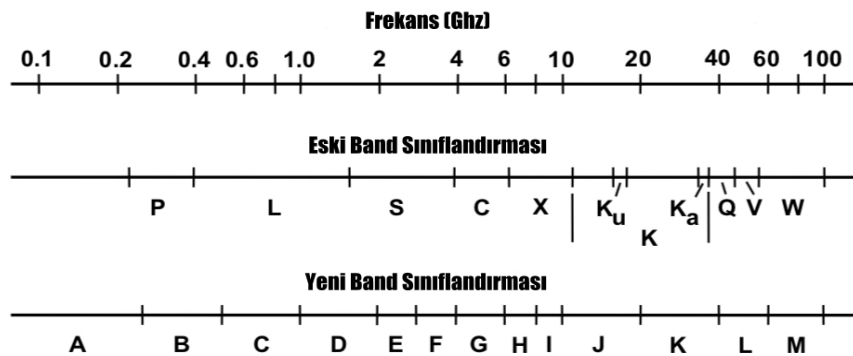


## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Denge halindeki elektron demetinin yarıçapı
AC	Alternatif akım
B	Manyetik Akı Seviyesi
$B_B$	Brillouin Akı Seviyesi
BWO	Backward Wave Oscillator
C	Işık hızı
CNC	Computer Numerical Control
CST	Computer Simulation Technologies
cm	Santimetre
CW	Continuous Wave
DC	Doğru akım
dB	Desibel
dBm	Desibel metre
e	Elektronların yükü
ECM	Elektronik karşı önlem
eV	Elektron volt
GHz	Giga Hertz
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
G	Gauss
J	Emisyon Akımı Yoğunluğu
K	Kelvin
K	Boltzmann Sabiti
Kg	Kilogram
$m_e$	Elektronların kütlesi
MDC	Multistage Depressed Collector
MHz	Mega Hertz
mm	Milimetre
OFHC	Oksijensiz Yüksek İletkenlikli Bakır
PPM	Periyodik Miknatıs Sistemi
PTFE	Poli Tetra Floro Etilen
RF	Radyo frekansı
SWS	Slow Wave Structure
SMA	Alt Minyatür Konektör
T	Tesla
THz	Tera Hertz
TWT	Travelling Wave Tube
UHF	Ultra High Frequency
UHV	Ultra High Vacuum
V	Elektron demetinin hızlandırma voltajı
$V_a$	Hızlandırma gerilimi
W	Watt
$\mu$	Mikron
$\psi$	Helis eğim açısı
$\lambda$	Dalga Boyu
$\phi$	İş fonksiyonu
$\eta$	Verimlilik

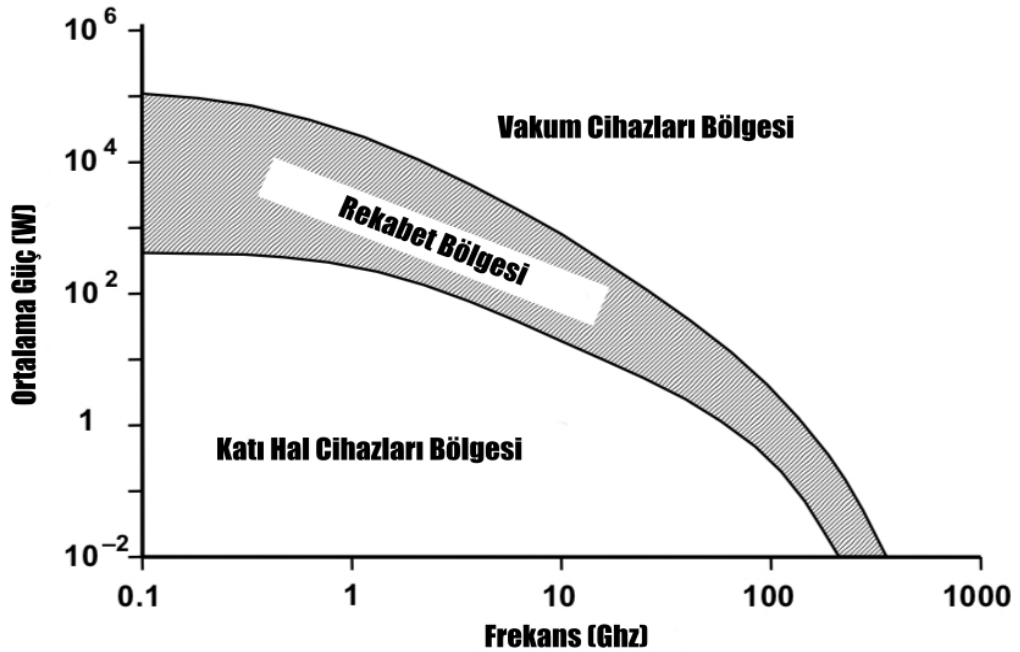
## 1. GİRİŞ

Mikrodalga tüpleri, mikrodalga frekans aralığında radyo frekanslarının üretilmesi ve çoğaltılması için kullanılan vakum elektroniği cihazlarıdır. Mikrodalga frekansları genellikle 1 GHz'den 100 GHz'e kadar bir değer olarak kabul edilir. Milimetre dalga frekans bölgesi, mikrodalga menzilin bir parçasıdır ve genellikle yaklaşık 30 GHz ila 300 GHz arasında olduğu kabul edilir (Gilmour, 2011). Mikrodalga tüpleri UHF-TV iletimi, gemi-uçak-yer tabanlı radarlarda, silahların yönlendirilmesi sistemlerinde, elektronik karşı savunma sistemlerinde, uydu iletişimde, füzyon araştırmalarında geniş kullanım yelpazesine sahiptirler. Yeni uygulamalar belirlendikçe, gelişmiş cihazlar ihtiyaçları karşılamak için tasarlanmıştır. Mikrodalga tüpü üreticileri, frekans, çalışma gücü ve verimlilik sınırlarını zorlamaya günümüzde devam etmektedirler. Mikrodalga teknolojisi bu nedenle gelişen bir bilimdir (Whitaker, 2000). Özellikle ikinci dünya savaşı yıllarında belirli bir kesim tarafından keşfi gerçekleştirildikten sonra geniş bir kesim tarafından geliştirilip kullanıma sunulmuştur. Uzak mesafeler arasında iletişimin gerçekleştirilmesinde, ses ve görüntü sinyallerinin aktarılmasında büyük roller oynamışlardır. Mikrodalga spektrumu birkaç frekans bandına bölünmüştür. En yaygın kullanılan iki bant tanımı Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Eski band tanımlaması, II. Dünya Savaşı sırasında oluşturulmuştur. Fakat daha mantıklı bir sistem sağlamak için kurulan yeni sınıflandırma, geniş çapta kabul görmemiştir.



Şekil 1.1. Eski ve yeni mikrodalga frekans bandlarının gösterilmesi (Gilmour, 2011)

Mikrodalga üreteçleri ve yükselteçleri iki sınıfa ayrılmaktadır. Bunlar vakum elektroniği tüpleri ve katı hal cihazlarıdır. Katı hal cihazları vakum elektroniği tüplerine göre daha yeni nesil sınıfindadırlar. Fakat günümüzde halen vakum elektroniği tüpleri üretilip kullanılmaktadır. Katı hal cihazları kıyaslama yapıldığı zaman belirli dezavantajlara sahiptir. Özellikle katı hal cihazlarının soğutma sistemleri daha fazla hacim ve ağırlık değerlerine sahiptir. Bu sebeple uzay sistemlerinde kullanımları uygun değildir. Uzay sistemlerinde verimlilik ve hafiflik ön plandadır. Katı hal cihazları genellikle düşük güç ve frekanslarda kullanışlı olmaktadır. Yüksek güç, yüksek frekans uygulamalarında vakum cihazlarının kullanılması baskınlık göstermektedir. Şekil 1.2'de frekans ve ortalama güç değerlerine göre katı hal cihazları ile vakum cihazlarının karşılaştırılması (Symons, 2002).



Şekil 1.2. Vakum cihazları ile katı hal cihazlarının uygulama aralıkları (Symons, 2002)

Yüksek güç ve frekans uygulamalarında baskın olan vakum cihazları çalışma prensiplerine göre üç sınıfa ayrılır. Bunlar doğrusal ışın tüpleri, çapraz alan tüpleri ve hızlı dalga tüpleridir. Çizelge 1.1'de vakum cihazlarının çalışma prensiplerine ve tasarımlarına göre sınıflandırması verilmiştir.

Çizelge 1.1. Vakum cihazlarının sınıflandırılması (Shulim, 2007)

Doğrusal Işın Tüpleri	Çapraz Alan Tüpleri	Hızlı Dalga Tüpleri
Klistronlar	Magnetronlar	Gyromonotronlar
İlerleyen Dalga Tüpleri	Çapraz Alan Yükselteçleri	Gyro Yükselteçler

Mikrodalga vakum cihazlarının band genişliği, çalışma frekansı ve çıkış güçlerine göre birbirlerinden üstünlükleri vardır. Çizelge 1.1'de verilen mikrodalga tüpleri arasında bulunan ilerleyen dalga tüplerinin band genişlikleri diğer vakum cihazlarından daha fazladır. Çünkü ilerleyen dalga tüplerinin dizayn parametreleri diğerlerinden daha fazladır. Bu durum band genişliği, çalışma frekansı ve çıkış gücünde yüksek seviyelere ulaşılmasına geçit vermektedir. Özellikle haberleşme alanlarında ve kontrol sistemlerinde band genişliği önemli bir yere sahip olmaktadır. İlerleyen dalga tüpleri teknolojik olarak eski olmasına rağmen günümüzde halen verimliliğini ve ömrünü arttırmak üzerine yapılan Ar-Ge çalışmaları devam etmektedir. Çünkü teknolojik yapıya sahip olan katı hal cihazları halen ilerleyen dalga tüpleri kadar verimliliğe sahip olmamaktadır. Taşınabilirlik ve maliyet ise ilerleyen dalga tüplerinin en büyük avantajıdır. İlerleyen dalga tüplerinin çalışma frekansı aralıkları genellikle 300MHz ile 100GHz arasındadır. Fakat terahertz seviyesine ulaşmak için çalışmalar sürmektedir. 40-70 dB seviyesi arasında kazanç sağlayabilirler. Gürültü seviyeleri oldukça düşüktür (Whitaker, 2000).

Süleyman Demirel Üniversitesi Plazma Araştırma Laboratuvarında yapılan bu tez çalışması ile prototip bir ilerleyen dalga tüpü dizayn edilmiştir. Daha sonra parametre tarama çalışmaları yapılmıştır.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

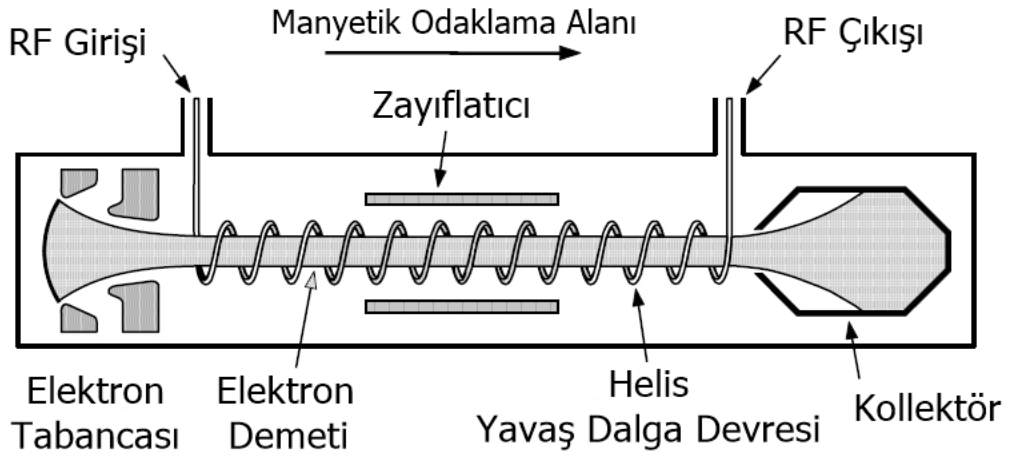
### 2.1. İlerleyen Dalga Tüplerinin Teorisi

İlerleyen dalga tüpleri mikrodalga sınıfının doğrusal ışın tüpleri veya O-tipi tüpler olarak adlandırılan grubunda bulunmaktadır. Güç çıkışları watt seviyelerinden megawatt seviyelerine kadar ulaşmaktadır. İlerleyen dalga tüpleri iki sınıfa ayrılmaktadırlar (Wathen, 1953). Bunlar;

- Helis tipi ilerleyen dalga tüpleri (geniş band uygulamaları)
- Kuplajlı Kavite tipi ilerleyen dalga tüpleri (yüksek güç uygulamaları)

Helis tipi ilerleyen dalga tüplerinde band genişlikleri 2 oktav veya daha yüksek seviyelere ulaşabilmektedir. Kuplajlı kavite tipi ilerleyen dalga tüplerinde ise band genişliği % 10-20 arasındadır (Gilmour, 2011).

İlerleyen dalga tüpleri temel olarak üç temel bileşenden oluşmaktadır. Bunlar; elektron tabancası, rf devresi ve kolektör'dür. Şekil 2.1'de Helis tipi ilerleyen dalga tüpünün donanımsal bileşenleri gösterilmiştir.



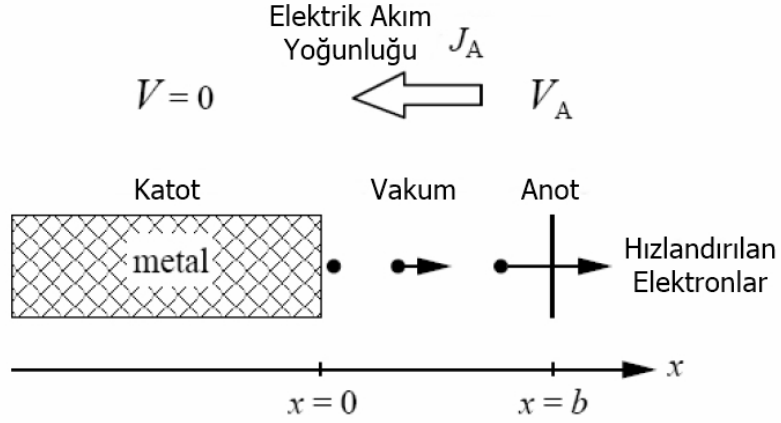
Şekil 2.1. Helis tipi ilerleyen dalga tüpünün bileşenleri (Gilmour, 2011)

İlerleyen dalga tüplerinin çalışmasındaki temel prensip elektron tabancasından çıkan elektron demetinin odaklanarak üzerinden RF sinyali geçen yavaş dalga devresinin içerisinden geçerken RF sinyali ile etkileşerek düşük güçte uygulanan RF sinyalinin çıkış portunda yüksek olarak elde edilmesidir.

## 2.2. Elektron Tabancası

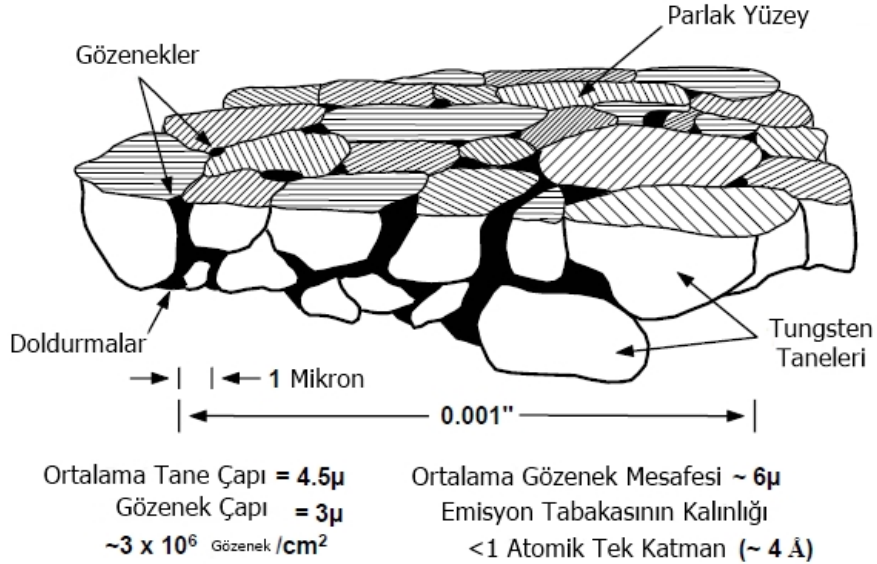
İlerleyen dalga tüplerindeki en önemli temel bileşen elektron tabancasıdır. Elektron tabancasının ömrü aynı zamanda ilerleyen dalga tüpünün ömrüdür. Elektron tabancalarında oluşan en önemli olay emisyondur. Vakum elektroniği cihazlarındaki temel olay termiyonik emisyondur. Termiyonik emisyon metal bir yüzeyin ısıtılarak yüzeyinde oluşan elektronların voltaj uygulanarak kinetik enerji kazandırılarak koparılmasıdır. Katot yüzeyinden elektron koparmak için yüzey sıcaklığı tungsten filaman ile 1100 K<sup>0</sup> seviyesine kadar çıkartılmaktadır (Reimann, 1934). Şekil 2.2'de termiyonik emisyonun çalışma prensibi gösterilmiştir. İlerleyen dalga tüpü sistemlerinin içi düşük basınçta tutulmaktadır. Bu basınç değeri yaklaşık olarak  $1 \times 10^{-9}$  torr seviyesinde tutulmaktadır (Eichmeier ve Manfred, 2008). Çünkü elektron tabancasının katot yüzeyi ve ısıtıcısı oksijen ortamında zarar görmektedir. Elektron tabancaları seramik kaplı tungsten ısıtıcı ve katot yüzeyinden oluşmaktadır.

Molibdenden yapılmış kovan şeklindeki malzemenin üzeri sinterleme teknikleri kullanılarak özel oksit bileşenler ile kaplanıp katot yapısı oluşturulmaktadır. Bunun sebebi katot ömrünün daha uzun olması ve iş fonksiyonunun düşürülmesidir. Çünkü iş fonksiyonu malzemenin yüzeyinden elektron koparmak için gereken enerjidir. Bu enerjinin düşük olması katot ömrünü uzatmaktadır. Katot yüzeyleri genellikle BaO (Baryum oksit) malzemedan yapılmaktadır. Bunun yanında alternatif olarak LaB<sub>6</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SrO, CaO gibi kaplamalarda kullanılmaktadır (Andrews, 1929). Fakat BaO bileşeninden oluşan katotlar daha yüksek emisyon akımı verebilmektedir. Oksit tipli katotlardaki en büyük problem zehirlenmedir. Yeterli vakum seviyelerine inilmediği zaman çalıştırılmaları risklidir. Çünkü ortamda bulunan su buharı ve oksijen katot zehirlenmesine yol açmaktadır. Bu zehirlenme sonucu katot yüzeyinin iş fonksiyonu değeri yükselmeye başlar ve emisyon akımı değerinde düşüş meydana gelir.



Şekil 2.2. Termiyonik emisyonun gerçekleşmesi (Jones ve Langmuir, 1927)

Şekil 2.2'de  $V_A$  katoda göre potansiyel farkı temsil etmektedir. Bu potansiyel fark katot' da bulunan elektronları anoda doğru çeker ve böylece elektronlar hızlandırılmış olur. Elektrik akımı  $I_A$  anottan katoda doğru akar ve akım yoğunluğunu  $J_A$  aynı değerde tutar. Şekil 2.3'de B tipi bir katodun birleşenleri ile beraber ölçeklendirilmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Katot yapısının içeriğinin ölçeklendirilmesi (Green, 1981)

Denklem (2.1)'de elektron emisyonu için gereken akım yoğunluğu ifadesi verilmiştir. Bu ifade Richardson-Dushman denklemi olarak bilinmektedir (Eastman, 1941). Bu denklemde  $J$  amper/ $\text{cm}^2$  olarak sıcak yüzeylerde oluşan emisyon akımı yoğunluğunu,  $A$  metaller için özel bir sabiti, yüzeyin kelvin

biriminden sıcaklığını,  $\phi$  elektron volt olarak malzemenin iş fonksiyonunu,  $k$  Boltzmann sabitini temsil etmektedir. Richardson-Dushman denkleminin en önemli yönü, akım yoğunluğunun iş fonksiyonu ve sıcaklık ile üstel olarak değişmesidir. Akım yoğunluğunun  $T^2$  ile değişimi, karşılaştırma yapılarak göz ardı edilebilir. Bu ifade sıcaklıktaki küçük bir değişimin göreceli etkileri dikkate alınarak kolayca kanıtlanabilir. Örneğin, 1000 derecelik tipik bir çalışma sıcaklığı için,  $T$ 'de % 1'lik bir değişim üstel terimin değerinde kabaca % 70'lik bir değişim yaratır, fakat sadece  $T^2$ 'de % 2'lik bir değişme gerçekleşir (Gilmour, 2011).

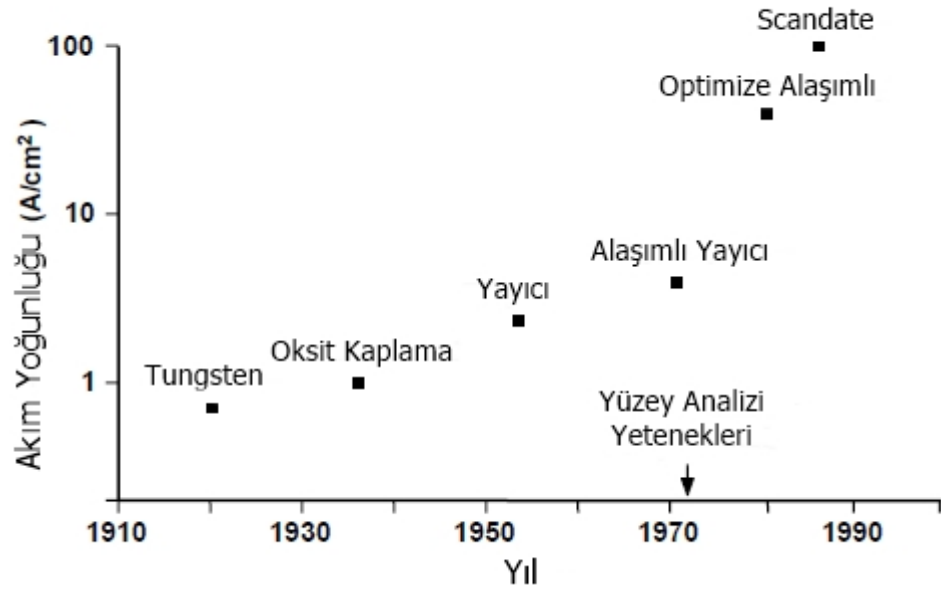
$$J=AT^2e^{-\phi/kT} \quad (2.1)$$

Çizelge 2.1. Bazı elementlerin eV cinsinden iş fonksiyonlarının gösterilmesi (Lide, 2008)

Ag	4,26	Al	4,28	As	3,75	Au	5,10	B	4,45	Ba	2,70
Be	4,98	Bi	4,22	C	5,00	Ca	2,87	Cd	4,22	Ce	2,90
Co	5,00	Cr	4,50	Cs	2,14	Cu	4,65	Eu	2,50	Fe	4,50
Ga	4,20	Gd	3,10	Hf	3,90	Hg	4,49	In	4,12	Ir	5,27
K	2,30	La	3,50	Li	2,90	Lu	3,30	Mg	3,66	Mn	4,10
Mo	4,60	Na	2,75	Nb	4,30	Nd	3,20	Ni	5,15	Os	4,83
Pb	4,25	Pt	5,65	Rb	2,16	Re	4,96	Rh	4,98	Ru	4,71
Sb	4,55	Sc	3,50	Se	5,90	Si	4,85	Sm	2,70	Sn	4,42
Sr	2,59	Ta	4,25	Tb	3,00	Te	4,95	Th	3,40	Ti	4,33
Tl	3,84	U	3,63	V	4,30	<b>W</b>	<b>4,55</b>	Y	3,10	Zn	4,33

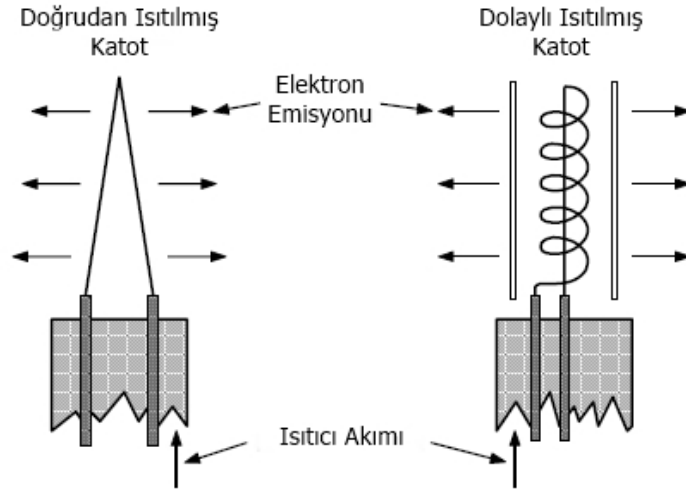
Çizelge 2.1'de belirli elementlerin eV cinsinden iş fonksiyonu değerleri verilmiştir. Metal bazlı katotlarda en çok kullanılan element tungsten olarak belirlenmiştir. Bunun en büyük sebeplerinden birisi termal direncinin yüksek olması ve bu yüzden de buharlaşmasının zor olmasıdır. Şekil 2.4'de termiyonik emisyonlu katotların tarihsel gelişimi gösterilmektedir.





Şekil 2.4. Termiyonik katot emisyonunun tarihsel perspektifi (Thomas vd. 1990)

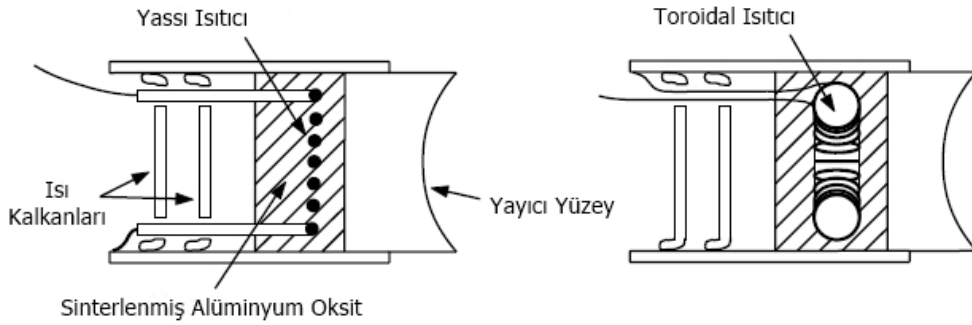
Daha öncede bahsettiğimiz gibi katot yapıları doğrudan ısıtmalı ve dolaylı ısıtmalı olarak ikiye ayrılmaktadır. Vakum elektroniği sistemlerinde genel olarak dolaylı ısıtmalı katot mekanizmaları kullanılmaktadır. Şekil 2.5'de katot ısıtma mekanizmaları gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Katot ısıtma yöntemleri (Gilmour, 2011)

Kullanım ömürleri açısından dolaylı ısıtılmış katotlar daha uzun ömürlüdürler. Çünkü doğrudan ısıtılmış katotlarda elektron ısıtılan yüzeyden koparılacaktır. Bu durum malzemede zayıflamaya neden olmaktadır.

Dolaylı ısıtılmış katotlarda elektron koparılan yüzey yüksek yoğunluğa sahip olduğu için kullanım ömrü daha fazla olacaktır. Katot ısıtıcıları genellikle dc veya ac gerilimle ısıtılırlar. AC gerilim kullanıldığında oluşturulan elektronlar gürültülü bir şekilde ilerlerler. Bu durum vakum elektronığı cihazlarında istenmeyen bir durumdur. Ayrıca oluşturulan veya yükseltelen sinyalde gürültülerin oluşmasına sebep olurlar. Gürültünün sebebi sıklıkla ısıtıcı akımı tarafından oluşturulan manyetik akıdır (Raczinski, 1982). Bu akı, katot yüzeyine uzanır ve katodu terk eden elektronların yörüngesini bozar. Şekil 2.6'da yayıcı katotlar için ısıtıcı düzenekleri gösterilmektedir. Özel radyasyon kılıfı ile manyetik akı sızıntısı minimuma indirilmektedir. DC ısıtıcı kaynakları kullanıldığı zaman gürültü sorunu ortadan kalkacaktır fakat ısıtıcıdan çıkan manyetik akı elektron ışını bozabilir ve daha yüksek kesme akımlarına neden olabilir.



Şekil 2.6. Yayıcı katotlar için ısıtıcı düzenekleri (Gilmour, 2011)

AC kaynakta polarite sabit olmadığı için bağlantı yönü önemli değildir. DC ısıtıcı kaynağı kullanıldığı zaman kaynağın polaritesi her zaman önemlidir. Isıtıcının bir tarafı katoda bağlıysa, bu taraf ısıtıcı kaynağının pozitif tarafına gitmelidir. Böylece ısıtıcı katoda göre negatif olmuş olur. Bu bağlantı tekniği katodun arkasından ısıtıcıya emisyon akımı geçmesine engel olmak için kullanılmaktadır. Böylece katot ısıtıcısının zarar görmesi engellenmiş olur. Isıtıcı katoda göre pozitif olsaydı, katodun arkasından istenmeden yayılan elektronları çekerdi.

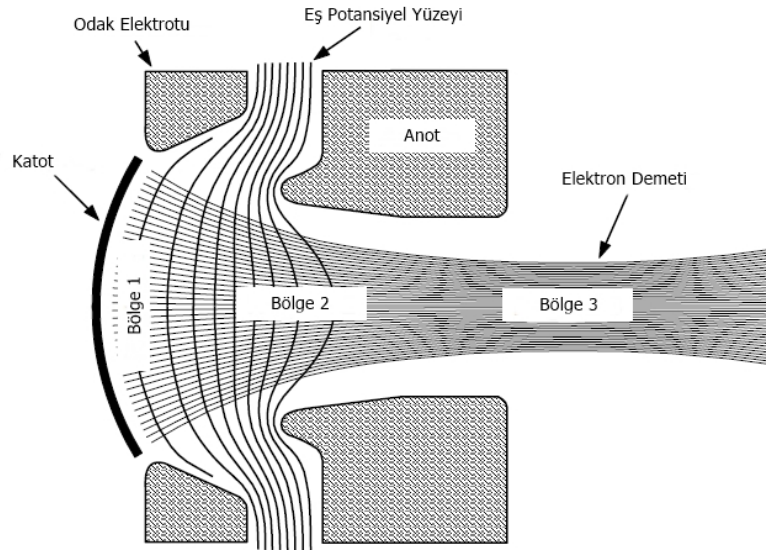
Bütün doğrusal ışın demetli vakum tüpleri için elektron tabancaları aynı prensipte çalışmaktadır. Tek önemli farklılıklar, güç gereksinimlerindeki farklılıklardan kaynaklanan boyut, çalışma voltajı ve akımıdır.

Elektron tabancalarının çoğu J. R. Pierce tarafından belirlenen kurallar kullanılarak tasarlanmıştır ve Pierce tabancaları olarak bilinirler (Pierce, 1954). Bir mikrodalga tüpündeki elektron tabancası, katot' dan elektronları bir mikrodalga devresi ile etkileşime uygun bir ışın haline getirmek için kullanılır. Elektron tabancası üreticileri en önemli iki sorunla başa çıkmak zorundadırlar. Bunlar:

- a) Elektronlar arasındaki elektrostatik itme kuvveti elektron demetinin bozulmasına sebep olmaktadır.
- b) Elektron ışını içinde gerekli olan akım yoğunluğu normal olarak katodun kabul edilebilir bir ömür beklentisiyle sağlayabileceği emisyon yoğunluğundan çok daha büyüktür.

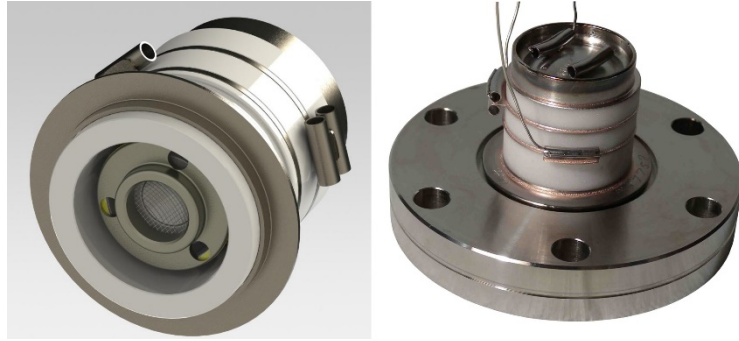
Pierce tarafından açıklanan bu sorunlara çözüm, Şekil 2.7'de özetlenmiştir. Tabancada manyetik alan olmadığı varsayılmaktadır. Elektronların termal hızları göz ardı edilebilir ve laminer elektron akışının olduğu varsayılmaktadır. Elektron tabancası üç bölgeye ayrılmıştır.

Birinci bölgede, bir dairesel enine kesite sahip bir elektron demetinin istendiği varsayıldığında, katot diskinin şekli küreseldir.



Şekil 2.7. Pierce elektron tabancasının çalışma prensibi (Pierce, 1954)

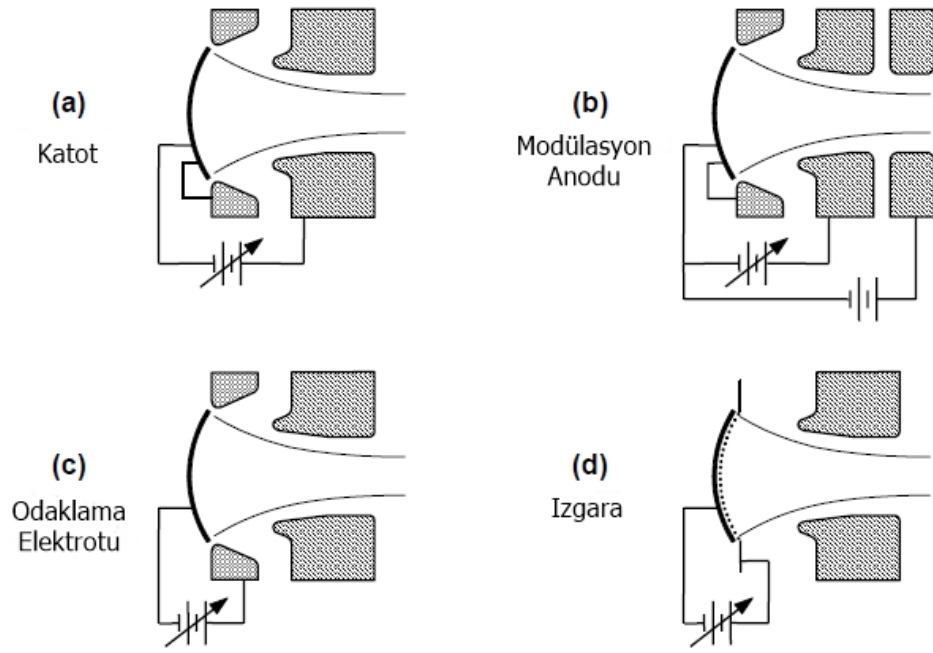
Odak elektrotu birinci bölgede bulunan ve katot yüzeyi ile aynı eğrilik merkezine sahip olan eş potansiyel yüzeyleri oluşturmak için tasarlanmıştır. Sonuç olarak elektronlar katodun eğriliğinin merkezine doğru akarlar. İkinci bölgede bulunan anot açıklığı elektronların geçmesine izin verir ve eş potansiyel yüzeyler anot açıklığına yayılır. Sonuç olarak elektron ışını üzerinde odaklama bozucu etki yaratarak farklı bir elektrostatik lens meydana gelmiş olur. Son olarak üçüncü bölgede, elektronlar katot-anot bölgelerinin hızlanma alanından kaçmış ve uzay şarjı kuvvetlerinin etkisi altında sürüklenmiştir. Böylece demetteki elektronlar, evrensel olarak ışık yayılan yörüngeleri takip ederler. Şekil 2.8'de Altairusa firmasının ürettiği elektron tabancası gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Yayıcı tip katotlu elektron tabancaları (Altairusa, 2018)

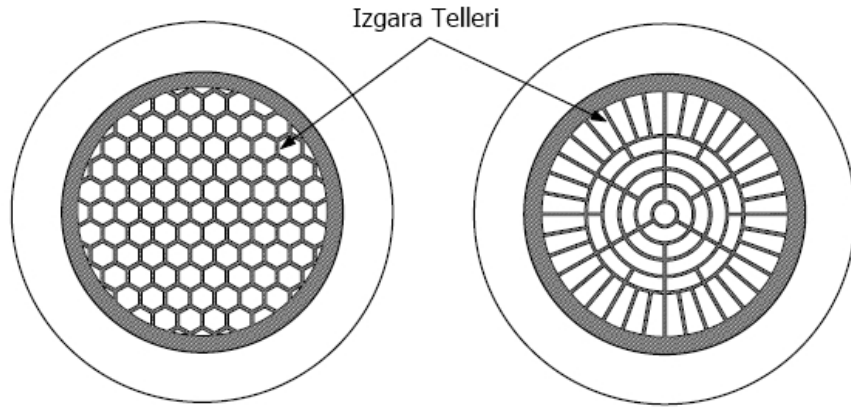
### 2.3. Elektron Demeti Kontrol Teknikleri

Mikrodalga tüplerinin tüm uygulamalarında elektron demeti akımı kontrol edilmelidir. Genellikle, demet akımı açılmalı ve kapatılmalıdır. Elektron demeti akımını kontrol etmenin hassas olmayan yöntemi Şekil 2.9 (a)'da gösterildiği gibi katot ile anot arasına voltaj uygulanmasıdır. Şekil 2.9 (b)'de gösterildiği gibi akım kontrolü için katot ve son anot arasına ikinci bir anot (modüle edici anot olarak adlandırılır) yerleştirilebilir. Bazı elektron tabancalarda akım, Şekil 2.9 (c)'de gösterildiği gibi odaklama elektrotu ile kontrol edilebilir. Uygulamaların çoğunda, akım kontrolü için Şekil 2.9 (d)'de gösterildiği gibi katot yüzeyine yakın bir veya daha fazla ızgara yerleştirilir. Birçok vakum elektroniği sistemlerinde ızgara yöntemi elektron demeti akımı kontrol edilmektedir.



Şekil 2.9. Elektron demeti akımını kontrol etme yöntemleri (Gilmour, 2011)

Şekil 2.10'da Pierce elektron tabancalarında elektron demeti akımını kontrol etmek için kullanılan ızgaralar gösterilmiştir.



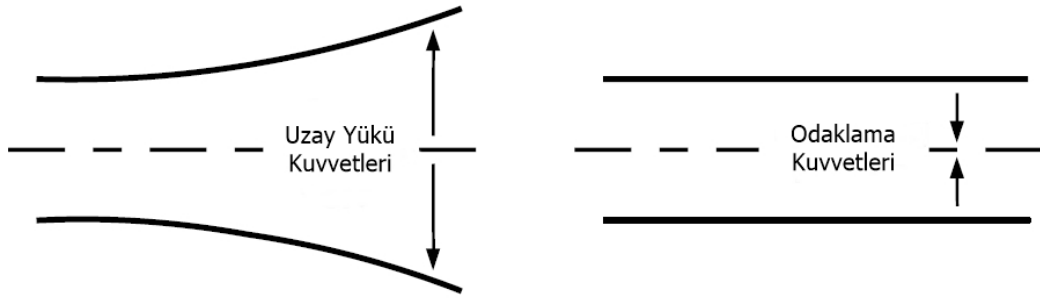
Şekil 2.10. Pierce elektron tabancalarında kullanılan kontrol ızgaraları (Gilmour, 2011)

Yaygın olarak kullanılan ızgara yöntemi ile elektron akımı yüksek hacimler kaplamadan kontrol edilebilmektedir. Iızgaralar genellikle refrakter malzemelerden yapılmaktadır.

Çünkü katot yüzeyine yakın oldukları için yüksek ısıdan dolayı etkilenebilmektedirler. Genellikle üretimde molibdenyum kullanılmaktadır.

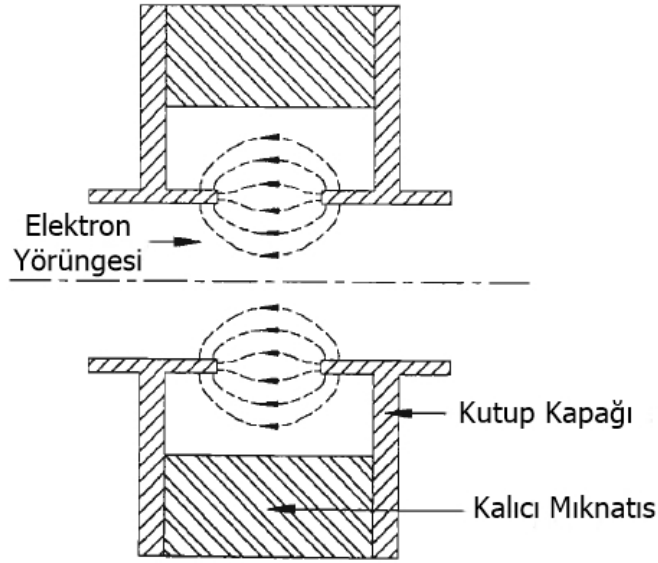
## 2.4. Elektron Demetinin Odaklanması

Elektron tabancasından çıkan elektronlar elektrostatik kuvvetlerden dolayı birbirlerini itmekteler. Vakum elektroniği cihazlarında elektronların bir demet halinde yönlendirilmesi istenmektedir. Elektron demetini odaklamak için elektrostatik (Einzel) lens ve manyetik lens sistemleri kullanılmaktadır. Vakum elektroniği sistemlerinde en çok kullanılan yöntem manyetik lenstir. Bunu sağlamak için periyodik kalıcı mıknatıs sistemi veya selenoid mıknatıs sistemi kullanılır (Stokes, 1990). Şekil 2.11'de gösterildiği gibi mikrodalga tüplerindeki birincil problem odaklama sistemi olmadığı zaman elektron demetinin uzay şarjı kuvvetlerinin etkisinden dolayı bozulmaya uğramasıdır. Fakat manyetik lens sistemi kullanılarak bu sorunlar aşılmaktadır.



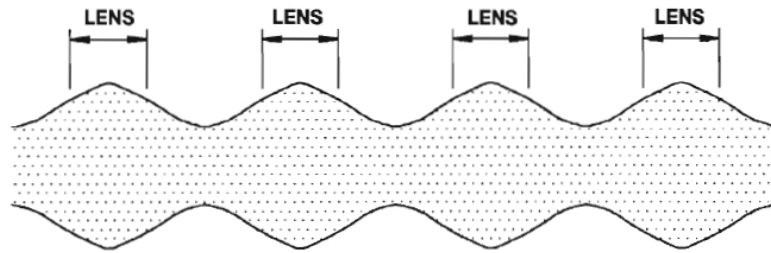
Şekil 2.11. Uzay şarjı kuvvetlerinin ve odaklama kuvvetlerinin elektron demeti üzerindeki etkileri (Gilmour, 2011)

Odaklama kuvvetleri sayesinde elektron demetindeki bozulmalar önlenebilmektedir. İki tip elektron demeti konsepti vardır. Bunlar: ideal elektron demeti ve gerçek elektron demetidir. İdeal elektron demeti tüm elektronların demet eksenine paralel ilerlediği, sabit akım yoğunluğu ve elektron hızına sahip olduğu demet olarak tanımlanır. Gerçek elektron demetlerinde böyle bir durum söz konusu değildir (Gewartowski ve Watson, 1965). Elektron demetini homojen bir forma sokmak için gerekli manyetik alan demetin akımının ve hızının bir fonksiyonu şeklinde tanımlanır. Elektron demetinin manyetik alan içerisindeki geometrisi taraklı bir yapıya sahiptir (Gittins, 1965). Belirli bir ideal elektron demetinin uzay şarjı kuvvetlerini dengelemek için Brillouin alanının aksenal manyetik alanına ihtiyaç vardır (Brillouin, 1945).



Şekil 2.12. Manyetik elektron lensi (Gewartowski ve Watson, 1965)

Periyodik kalıcı mıknatıs sistemi elektron demeti üzerinde odaklama kontrolü sağlanabilmektedir. Şekil 2.12’de tek bir manyetik elektron lensi gösterilmiştir. Böyle bir lensin içinden geçildiği zaman elektron demeti birleşecektir. Lens sistemi içerisinde hareket eden elektron demeti uzay şarjı kuvvetlerinin etkisi ile birbirinden ayrıldığı kadar tekrar birbirlerine yakınlaşacaklardır. Şekil 2.13’de lens sisteminin etkisi gösterilmiştir. Bir elektron ışını üzerindeki yakınsama kuvveti, içinde yol aldığı manyetik alanın karesinin bir fonksiyonu olarak kullanılabilir (Gewartowski ve Watson, 1965). Periyodik lens sistemi kurulurken eş kutuplu mıknatıs yüzeyleri birbirlerine bakacak şekilde yerleştirme yapılmaktadır. Böyle bir yerleştirme sonucu aksenal pozisyonla periyodik olarak değişen periyodik kalıcı bir mıknatıs sistemi meydana gelmiş olur.



Şekil 2.13. Eşit aralıklı lens sisteminin odaklama mekanizması (Gewartowski ve Watson, 1965)

Periyodik mıknatıs sisteminde manyetik alan şiddeti merkez eksen üzerindeki herhangi bir noktada homojen değere sahiptir (Ura ve Terada, 1966). Periyodik mıknatıs sisteminin avantajlarından en önemlisi, bir PPM 'de bulunan N tane lens kümesinin manyetik alan şiddeti, N<sup>2</sup> tane lensli sistemle aynı değere sahip olması ve ağırlık olarak daha hafif olmasıdır. Mendel ve arkadaşları, 230 mm uzunluğunda 450 G aksenal bir alan üreten tek parça mıknatısın 17 kg ağırlığında olduğunu ancak eşdeğer periyodik mıknatıs sisteminin sadece 0,6 kg ağırlığa sahip olduğunu belirtmiştir (Mendel vd. 1954). Belirli bir periyodik aksenal alan üretmek için daha az manyetik malzeme gereklidir. PPM yapıları, sabit mıknatıslı homojen alan yapılarına göre daha düşük dış sızıntı alanlarına sahiptir. Ayrıca PPM yapılarında ekstra güç beslemesine ihtiyaç duyulmadığı için selenoid yapıli mıknatıs sistemlerinden daha avantajlıdır.

$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = \eta r \dot{\theta} B + \eta \frac{\partial V}{\partial r} \quad (2.2)$$

Elektron demetini odaklamak için kullanılan mıknatısı sistemleri silindirik yapıda olduğu için elektron demetinin geometrik yapısını silindirik olarak düşünebiliriz. Silindirik koordinatlarda (r, θ), elektron demetindeki bir elektronun hareketi denklem (2.2)'de belirtilmiştir. Denklemdeki B aksenal manyetik alanı temsil etmektedir ve B<sub>z</sub> sembolü ile gösterilir. V uzay yükleri nedeniyle oluşan elektrik potansiyelini, η yükün kütleye oranını temsil etmektedir. Son terim ise uzay-yük itişini modüle eder ve odak bozulmasından sorumludur (Ding, 1965).

Elektron demetinin yarıçapı aksenal mesafeyle hızlı bir şekilde değişmezse, Gauss teoremini kullanarak denklem (2.3) elde edilebilir.

$$\frac{\partial V}{\partial r} = \frac{r_c^2 \rho}{2\epsilon_0 r} \quad (2.3)$$



Denklem (2.3)'deki  $r_c$  katot yarıçapını,  $\rho$  hacim yük yoğunluğunu,  $\epsilon_0$  boşluktaki dielektrik sabitini temsil etmektedir.

$$\dot{\theta} = \frac{-\eta}{2} \left( B_z - B_c \frac{r_c^2}{r^2} \right) \quad (2.4)$$

Denklem (2.4) Busch teoremi olarak bilinmektedir.  $B_c$  katodun merkezinden geçen aksenal manyetik alanı temsil etmektedir. Busch teoremi, açısal momentumun korunmasının eşdeğeri olarak görülebilir. Busch teoremi elektronun açısal hızının sadece başlangıç noktasındaki (katotta) manyetik akış farklılıklarına bağlı olduğunu belirtir. Verilen denklemler bir araya getirildiğinde aşağıdaki denklem ortaya çıkmaktadır.

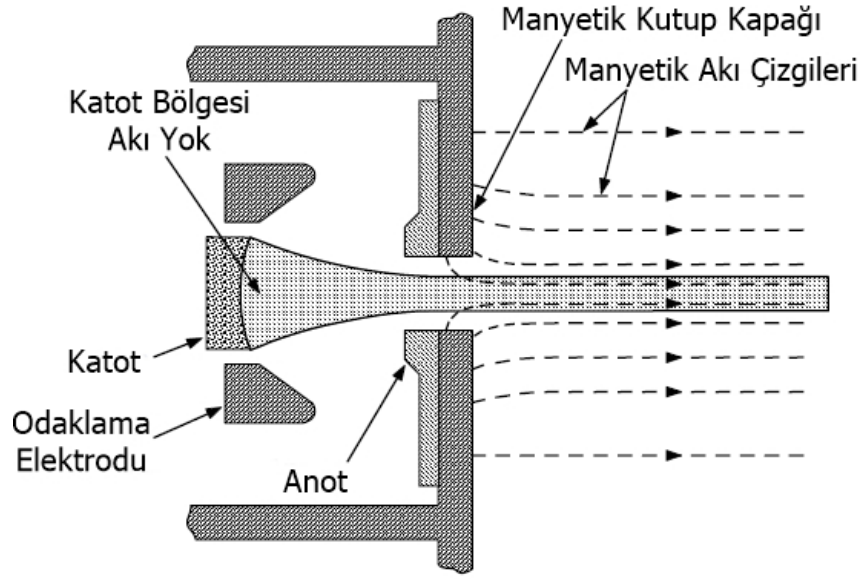
$$\ddot{r} + \left( \frac{\eta}{2} B_z \right)^2 r - \left( \frac{\eta}{2} B_c r_c^2 \right)^2 \frac{1}{r^3} - \frac{r_c^2 \eta \rho}{2r} = 0 \quad (2.5)$$

Denklem (2.5)'deki üç terim, sırasıyla manyetik odaklama kuvvetini, merkezkaç kuvvetini ve uzay şarjı itmesini temsil etmektedir.

Pratikte, Brillouin alanından yüzde 50 ile 100 daha güçlü olan odaklama alanları, TWT'lerin çıkış bölümlerinde gerçek uzay şarjı modülasyonlu elektron demetlerinin yeterli şekilde tutulmasını sağlamak için kullanılır (Vaughan, 1977).

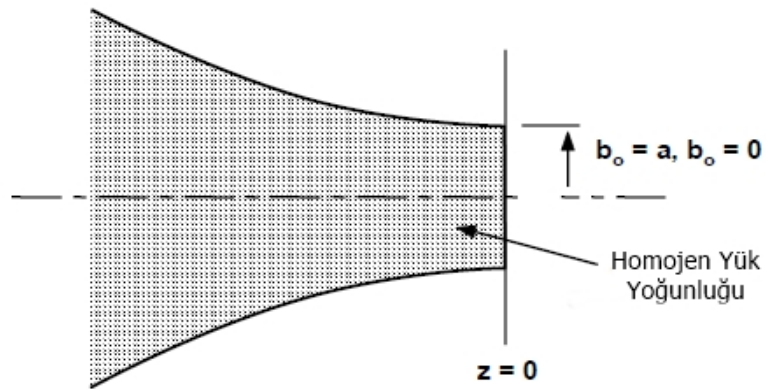
Homojen yük yoğunluğu ve katot boyunca manyetik akı olmaksızın, uzay şarjını ve merkezkaç kuvvetlerini tam olarak dengeleyen manyetik bir kuvvet üreten manyetik akı seviyesi,  $B_B$  sembolü ile gösterilen Brillouin akı seviyesi olarak adlandırılır. Sabit çaplı dönen bir elektron demeti formunda ortaya çıkan elektron hareketi Brillouin akışı olarak adlandırılır (Gilmour, 2011).

Brillouin akışını başlatmak için elektron tabancası ve manyetik kutup kapağının konfigürasyonu Şekil 2.14'te gösterilmiştir.



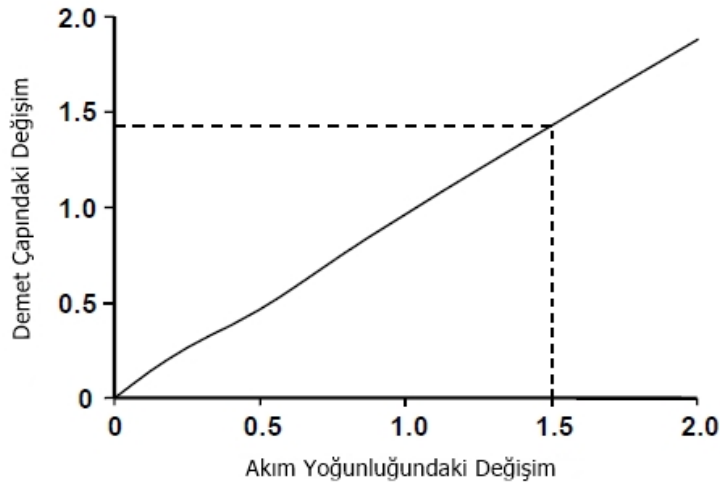
Şekil 2.14. Brillouin akışını başlatmak için elektron tabancası ve kutup kapağının konfigürasyonu (Gilmour, 2011)

Elektron demeti, tüpün toplayıcı ucundaki manyetik alandan çıktığında, etkileşim dizisi, elektron demetinin manyetik alana girişinin tam tersidir. Yani, elektron demeti manyetik alandan ayrılırken, radyal sıkıştırma kuvveti ortadan kalkar, rotasyon durur ve elektron demeti, toplayıcıya girerken uzay yük kuvvetlerinin etkisi altında genişlemeye başlar. Brillouin akışının gerçekleşmesi için, elektron demeti homojen bir yük yoğunluğuna sahip olmalı ve manyetik alanda hiçbir radyal elektron hareketi olmadan ve  $a$  yarıçapı,  $b_0$  denge yarıçapına eşit olan bir eksene girmesi gerekir. Buradaki  $a$  uzay şarjının ve merkezkaç kuvvetlerinin manyetik kuvvetler tarafından dengelendiği yarıçapı temsil etmektedir. Bu durum Şekil 2.15’de gösterilmiştir.



Şekil 2.15. Brillouin akışı için giriş koşulları (Gilmour, 2011)

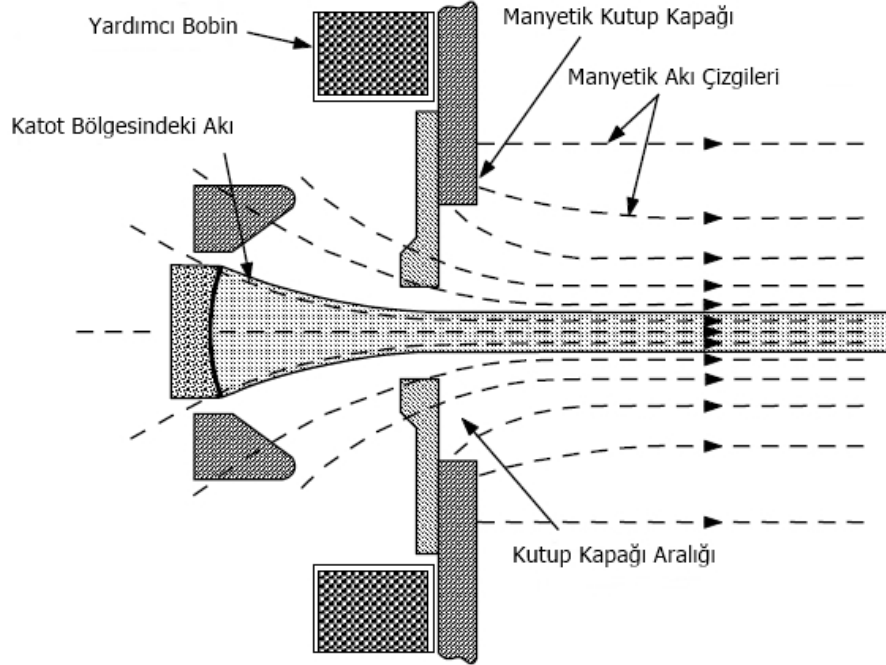
Brillouin akışının temel avantajlarından birisi gerekli olan manyetik alan değerinin, diğer odaklama tekniklerinden daha düşük olmasıdır. Birincil dezavantajı ise, elektron demetinin yanlış hizalamalara ve pertürbasyonlara aşırı duyarlı olmasıdır. Elektronların RF kümelenmesinden kaynaklanan elektron demeti akımındaki bir değişimin etkisi Şekil 2.16'da gösterilmiştir. Akımdaki % 50'lik bir artış, elektron demeti çapında % 40'ın üzerinde bir artışa sebep olmuştur.



Şekil 2.16. Elektron demetinin akım yoğunluğu ile demet çapı arasındaki değişim (Gittins, 1965)

Pratikte, katodun çevresi korumalı olsa bile kullanılan manyetik odaklama alanı Brillouin değerinden daha büyüktür. Bunun nedenleri arasında çapraz elektron hızları (elektron tabancasındaki termal ve diğer etkilerden) ve RF modülasyonundan kaynaklanan elektron demeti boyutunun artışı sayılabilir. Pratikte, elektron demetinin pertürbasyonlara olan yüksek hassasiyeti nedeniyle Brillouin yöntemi ile odaklamanın kullanılması önerilmez. Bunun yerine, Şekil 2.17'de gösterildiği gibi, odaklama alanını sağlayan manyetik devre, manyetik akı çizgilerinin katottan geçmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Bu tasarım, elektron demetini odaklanmak için Brillouin değerinden çok daha büyük bir manyetik alanın kullanılmasını mümkün kılar. Ayrıca, bu tasarım elektron demetinin taraklanmasına neden olmadan çalışabilmektedir.

Bu tür bir odaklama, sınırlandırılmış akış veya daldırılmış akış odaklaması olarak adlandırılır.



Şekil 2.17. Sınırlandırılmış akışı başlatmak için kullanılan tasarım (Gilmour, 2011)

Odaklama sisteminde kullanılan gerçek manyetik akı yoğunluğu olan  $B$  ile Brillouin akısı olan  $B_B$  ve sınırlama faktörü olan  $m$  arasındaki ilişki denklem (2.6)'da gösterilmiştir.

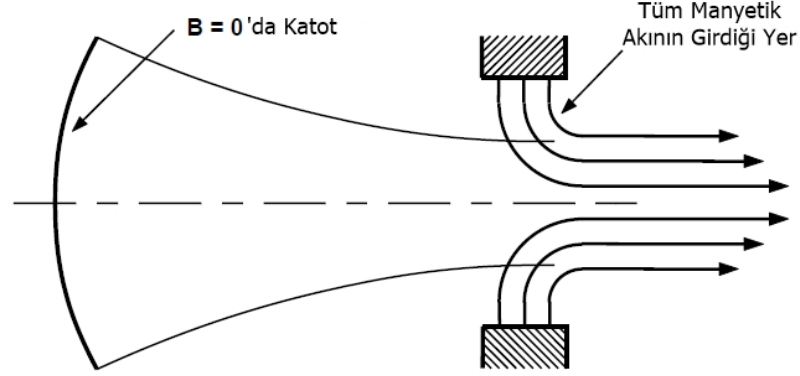
$$B = mB_B \quad (2.6)$$

Bu ilişkiyi kullanarak denge halindeki elektron demetinin yarıçapı aşağıdaki gibi olur;

$$\frac{b_e}{a} = m \quad (2.7)$$

Yukarıdaki denklemde  $b_e$  Brillouin alanını,  $a$  odaklama alanını temsil etmektedir.

Yani, sınırlandırılmış akış için, denge yarıçapının Brillouin yarıçapına oranı, odaklama alanının Brillouin alanına olan oranına eşittir. Daha öncede bahsedildiği gibi Brillouin akışlı odaklama kullanıldığında, katot bölgesinde hiçbir manyetik akı yoktur ve sınırlama faktörü olan  $m = 1$  değerine sahiptir. Manyetik alanın yapısı Şekil 2.18'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.18. Brillouin akışı için odaklama yapısının girişindeki manyetik alanın yapılandırılması (Gilmour, 2011)

Brillouin akışı için gerekli olan manyetik akı, diğer manyetik odaklama tekniklerinden daha küçüktür. Brillouin akı yoğunluğunun değeri, denge halindeki elektron demetinin yarıçapından belirlenebilir ve şu şekilde ifade edilir:

$$B_B = 0.83 \times 10^{-3} \frac{I^{1/2}}{aV^{1/4}} \quad (2.8)$$

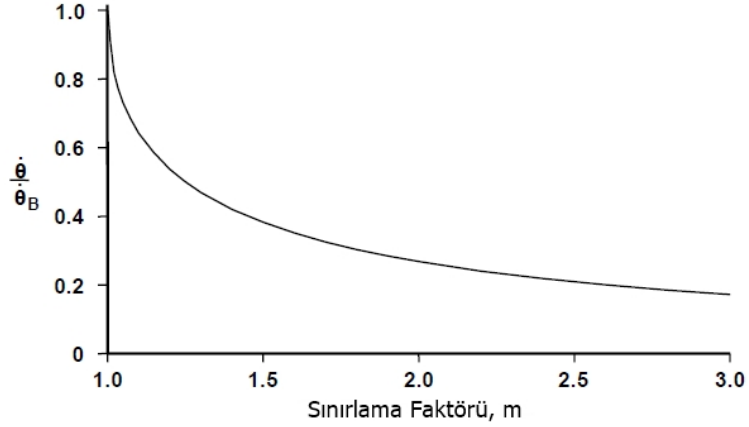
Yukarıdaki ifadede  $I$  elektron demetinin akımını,  $V$  demet voltajını ve  $a$  elektron demetinin yarıçapını temsil etmektedir.

Manyetik akı yoğunluğu minimize edildiğinden, mıknatıs yapısının boyutu (kalıcı mıknatıs veya solenoid kullanılarak) Brillouin akışı ile en aza indirilir. Busch teoremini kullanarak, sınırlandırılmış akış odaklamasının ayrıntılarını daha net anlamak mümkündür.

Buradaki  $\theta$  elektron demetinin rotasyon oranını,  $\theta_B$  ise Brillouin odaklaması ile oluşturulmuş elektron demetinin rotasyon oranını temsil etmektedir.

$$\frac{\dot{\theta}}{\dot{\theta}_B} = m - (m^2 - 1)^{1/2} \quad (2.9)$$

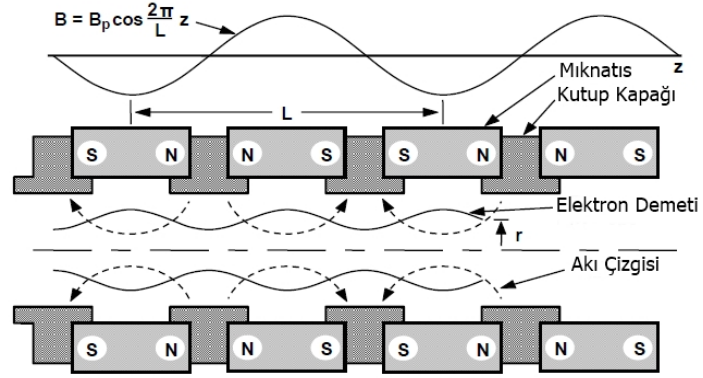
Şekil 2.19'da yukarıda verilen denklemin grafik üzerinde yorumlanması gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Rotasyon oranları ile sınırlama faktörü arasındaki ilişkinin grafik ile gösterilmesi (Gilmour, 2011)

Tek yönlü manyetik alan üreten kalıcı bir mıknatıs, bir elektron ışınının odaklanması için solenoid mıknatısın yerine kullanılabilir. Bu, güç kaynağı gereksinimini ortadan kaldırır ve manyetik odaklama alanının daima mevcut olmasını sağlar. Bu sistemlerin dezavantajlarından en önemlisi boyut ve ağırlıktır. Ayrıca, bazı uygulamalardaki dezavantaj, manyetik alanın optimize edilmiş tüp performansına ayarlanmasının mümkün olmamasıdır. Solenoid yapılarında bu ayarlama mümkündür. Her iki sisteminde birbirinden artıları ve eksileri bulunmaktadır. Şekil 2.20'de PPM sisteminin dizaynı ve aksinel manyetik alanın formu gösterilmiştir. PPM sistemi oluşturulurken eş kutuplu mıknatıslar birbirlerine bakacak şekilde dizilim gerçekleştirilmektedir. PPM yapılarında kullanılan mıknatıslar genellikle samaryum kobalt (SmCo) ve alüminyum nikel kobalt (AlNiCo) serisidir. Özellikle Alnico 5 ve 8 serisi mıknatıslar TWT sistemlerinde tercih edilmektedir (Stokes, 1990). Çünkü bu mıknatıslar yüksek sıcaklıklara ve fiziksel darbelere karşı oldukça dayanıklıdır. Bu mıknatıslar vakum elektronu sistemlerinde oldukça yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Manyetik kutup kapakları eş kutuplu mıknatısların birbirlerine boşluk kalmayacak şekilde tutunmasını sağlamak için kullanılmaktadır. Kutup kapakları genellikle çelikten üretilmektedir.

Mıknatıslardaki bazı kusurları yok etmek için genellikle mıknatıs halkası kullanılmaktadır (Mulcahy vd. 2009). Bu halka demirden üretilmektedir. Görevi manyetik akıyı kalibre etmektir. Çünkü manyetik akıdaki herhangi bir bozukluk elektron demetinin yanlış odaklanmasına sebep olur.



Şekil 2.20. Bir elektron demetinin kalıcı mıknatıslarla periyodik olarak odaklanması (Gilmour, 2011)

PPM ile odaklamanın temel prensibi basittir. Bir elektron demeti, bir mıknatıs bölümünün alanına girdiğinde, elektronların üzerindeki kuvvetler, Brillouin odaklanması için tarif edilenle aynı şekilde hareket eder. Yani, elektron demeti dönmeye başlar ve dönüş hareketinin aksenal manyetik alanla etkileşimi, elektron demetini sıkıştıran bir radyal kuvvet üretir. Böylece elektron demeti saçılmadan belirli bir doğrultuda ilerlemiş olur. PPM sistemleri yüksek şiddette manyetik alan üretebilmektedirler. Örnek olarak; 0.6T şiddetine ulaşılmıştır (Zhang vd. 2008).



Şekil 2.21. TWT sistemlerinde kullanılan AlNiCo serisi halka ve yarım halka mıknatıslar (Electronenergy, 2018)

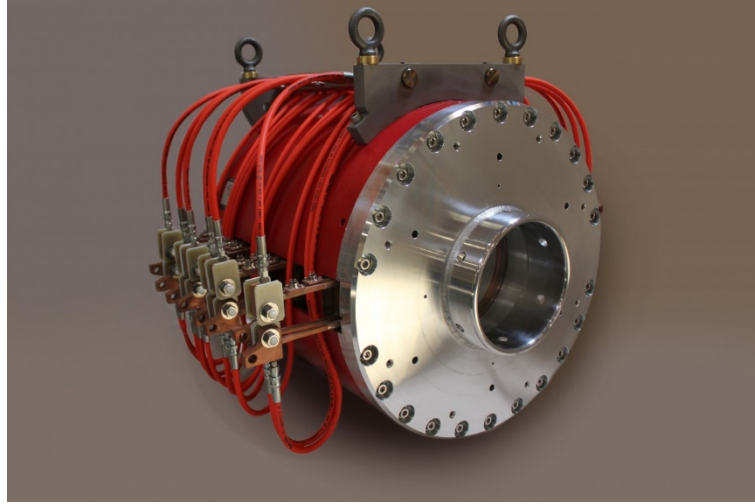
Elektron demeti mıknatıs bölümünü terk ederken dönme durur, odaklama güçleri kaybolur ve elektron demeti uzay şarjı kuvvetlerinin etkisi altında genişler. Çalışmalarda, manyetik alanın sadece aksenal pozisyonun bir fonksiyonu olduğu ve sadece radyal varyasyonların meydana gelmediği varsayılmaktadır (Gilmour, 2011). Bu varsayım, manyetik alanın mesafe ile sinüzoidal olarak değiştiği ve z eksenini boyunca ilerlediğini söylemektedir.

Z eksenini yönünde ilerleyen manyetik alanın ifadesi aşağıdaki denklemde ifade edilmiştir.

$$B_z = B_p \cos \frac{2\pi z}{L} = B_p \left( \frac{1 + \cos(4\pi z/L)}{2} \right)^{1/2} \quad (2.10)$$

Yukarıdaki denklemde  $B_p$  manyetik alanın tepe değerini,  $L$  mıknatıs periyodunu ya da bitişik kutup kapakları arasındaki mesafenin iki katını temsil etmektedir.





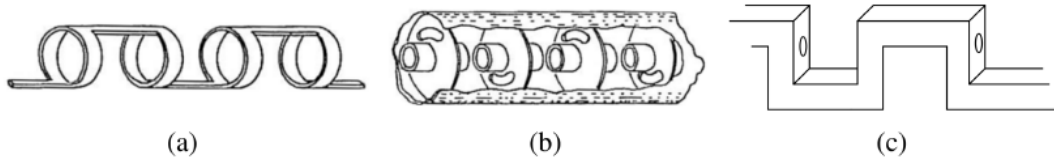
Şekil 2.22. Mikrodalga tüplerinde kullanılan selenoid mıknatis (Alphamag, 2018)

Şekil 2.22’de yüksek güçlere çıkabilen mikrodalga tüplerinde kullanılan bir selenoid mıknatis gösterilmiştir. Mikrodalga tüplerinde kullanılan selenoid mıknatisler genellikle yüksek akım ve düşük voltaj değerlerine sahip DC gerilimler ile çalışmaktadırlar. AC gerilim yerine DC gerilim kullanılmasının sebebi sabit yönde bir manyetik alanın elde edilmek istenmesidir. Bu yöntemli odaklama sistemlerinde hava ya da su soğutma kullanılmaktadır. Çünkü yüksek akımlar ile çalışmalar yapıldığı için teller ısınmaktadır. Bu tarz sistemler genellikle yeryüzünde kullanılmaktadır. Uzay çalışmalarında ve havacılıkta kalıcı mıknatıslı sistemler tercih edilmektedir. Çünkü selenoid sistemler besleme kaynakları da işin içine dâhil edildiğinde oldukça ağır yapılara sahiptirler. Bu durum bir dezavantajdır. Kalıcı mıknatıslı sistemler oldukça hafiftirler.

## 2.5. Yavaş Dalga Yapısı ve RF Sinyalinin Güçlendirilmesi

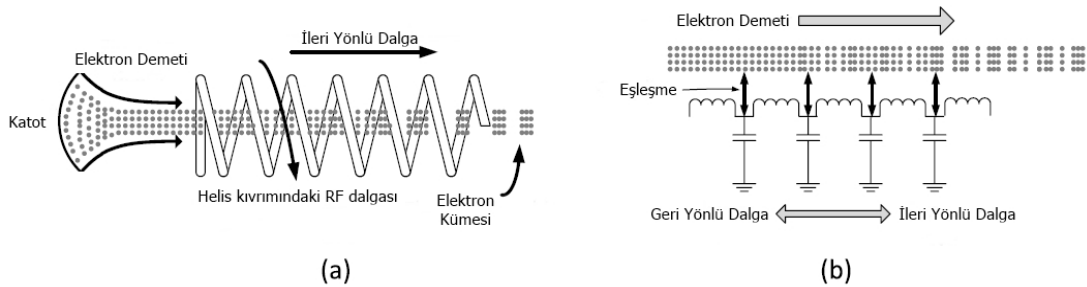
TWT sistemlerinin en önemli bileşenlerinden biriside yavaş dalga yapısı dediğimiz RF devresidir. Elektron demetinden RF dalgalarına enerji transferi için elektron demeti-dalga etkileşiminin gerçekleştiği bir mikrodalga tüpünde etkileşim yapısı rezonans veya yayıcı tipindedir. Yavaş dalga yapısında RF dalgası ışık hızından daha yavaş bir hıza sahip şekilde ilerler. Buradaki RF dalgasının hızı grup hızı olarak bilinmektedir. Normal şartlar altında RF dalgaları elektromanyetik dalgalar oldukları için ışık hızında hareket ederler. Fakat yavaş dalga yapısı sistemi içerisinde ilerledikleri mesafe uzun olduğu için

yavaş bir grup hızına sahip olurlar. Benzer şekilde, silindirik bir dalga kılavuzu, ışığın hızından daha büyük bir faz hızında RF dalgalarını ileten hızlı dalga yapısıdır. Bununla birlikte, dalga kılavuzu kapalı uçlu veya açık uçlu olarak dizayn edildiğinde bir rezonatör olarak kullanılabilir. Örneğin, bir açık uçlu dalga kılavuzu rezonatörü, hızlı dalga sistemine sahip gyrotronun etkileşim yapısı olarak kullanılmaktadır (Edgecombe, 1993). Helis yapısının yanı sıra TWT'lerde yaygın olarak kullanılan üç SWS Şekil 2.23'de gösterilmiştir. Şekil 2.23'de (a) birleştirilmiş kavite yapısı, (b) iki dahili kontra-sarmal sargıya sahip helis yapısı, (c) bükülmüş dalga kılavuzu sistemini temsil etmektedir.



Şekil 2.23. Yavaş dalga yapıları (Basu, 1996)

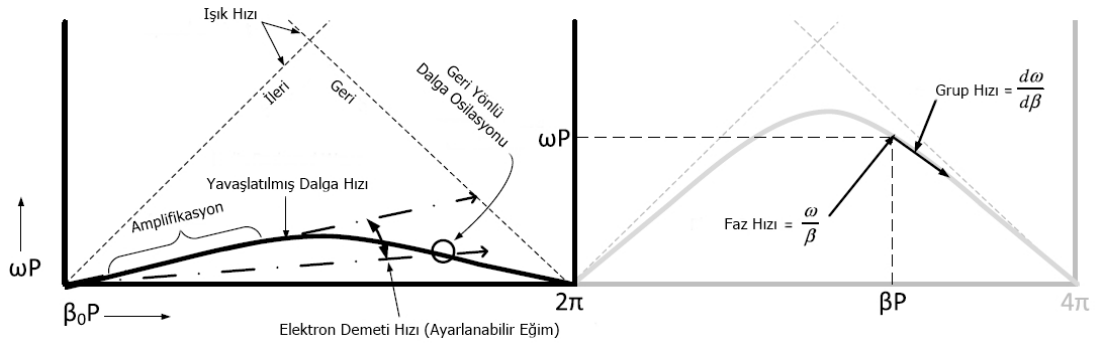
Elektron demetinin hızı, yavaş dalga yapısının RF faz hızı ile neredeyse eşzamanlı olarak ilerlediği zaman, elektron demeti yapının içinden geçerken, SWS'nin uzunluğu boyunca büyüyen dalga-elektron demeti etkileşimi gerçekleşir. Elektron demeti ile etkileşim için daha yüksek bir elektrik alanı sağlayan yapının etkileşim empedansı daha yüksek bir cihaz kazancı ve verimi sağlar (Hutter, 1960).



Şekil 2.24. Helis yapılı bir TWT'de iletim hattının devre olarak karşılığı (Pierce, 1950)

Şekil 2.24 (b)'de Pierce modeli helis tipi TWT yapısının iletim hattının devre karşılığı gösterilmiştir. Bu modelde seri bir şekilde bağlanmış eş bobinlere topraklanmış eş kapasitörler periyodik olarak bağlanmıştır.

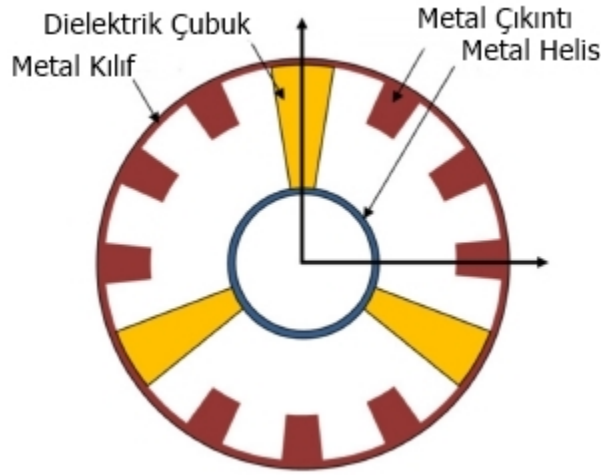
Bu model aynı zamanda TWT yapısını anlamamızı kolaylaştırmaktadır. İletim hattının elektron demeti ile bağlantı kurması, hat boyunca periyodik bir akım enjeksiyonu ile sonuçlanır ve bu periyodik eşleşme sisteme bağlı olarak, ilerleyen dalga amplifikasyonuna veya salınımına neden olur. İletim hattı modelinden ortaya çıkan geleneksel parametreler de bu durumda işimizi kolaylaştırır. Bu parametreler; iletim hattının empedansı, hareket eden bir dalganın faz yayılım sabiti ve hat boyunca enerjinin yayılmasını tanımlayan grup hızıdır. Yavaş dalga devresi, uzayda periyodik olan bir elektromanyetik dalgayı Fourier uzay harmoniği dizisine ayırıştırarak bir elektromanyetik kılavuz yapısıdır. Bu ifade vakum elektronu endüstrisinde bir dispersiyon diyagramı, Brillouin diyagramı veya omega-beta diyagramı olarak adlandırılır (Brillouin, 1953).



Şekil 2.25. Elektron demetinin etkileşim noktaları ile birlikte helis yavaş dalga yapısının omega-beta (dispersiyon) diyagramı (Bunch, 2013)

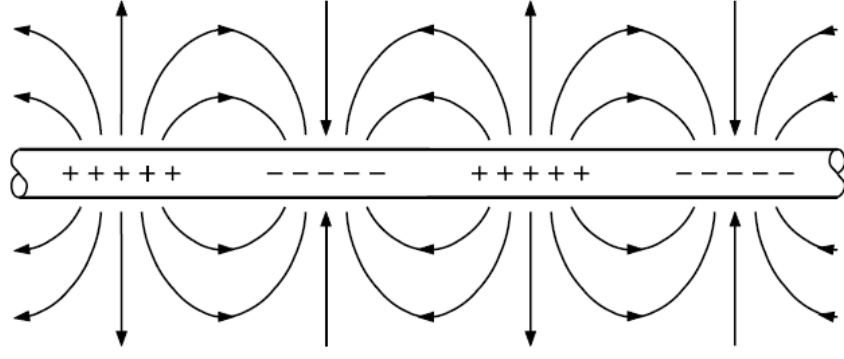
Şekil 2.25'de helis yapıları için omega-beta diyagramı verilmiştir. Çizilmiş alanlar, helisin periyodu ( $P$ =adım) boyunca bir Fourier serisinde genişletildilçe, diyagram  $2\pi$ 'de tekrarlanır. Omega-beta diyagramı, uzay harmoniğinin iki bileşenini gösterir. Bu diyagramda  $2\pi$  periyodiktir ve her bir bölgedeki helisin dispersiyonu verir. Dispersiyon eğrisinin herhangi bir noktasında, faz ve grup hızları  $\omega / \beta$  (faz hızı) ve  $d\omega / d\beta$ 'den (grup hızı) hesaplanabilir. Uzay harmoniğinin elektron demeti ile etkileşimi, elektron hızının değerine bağlı olarak sabit bir eğim olarak ifade edildiği görülmektedir. Elektron demeti çizgisi, helis dispersiyonunun düz kısmı boyunca yer aldığından, hem faz hızı hem de grup hızının eğimi pozitif olmaktadır (Bunch, 2013).

Birleştirilmiş kaviteli SWS yapısı, ilerleyen RF dalgalarını yavaşlatmak için düzenli bir aksenal aralıkta yerleştirilen rondelalar şeklinde engellere sahip dairesel bir dalga kılavuzudur (Gilmour, 1986). Tipik olarak kıvrımlı-hat yapısı olan birleştirilmiş kavite sistemi, kademeli bir yarık kombinasyonunda, delikler veya yarıklar ile birleştirilmiş ardışık boşluklara sahip bir oyuklar zinciri olarak dizayn edilmiştir. Ardışık iki kavitede yapının alanları aynıdır. Ancak, 180 ° 'lik bir faz farkına sahiptirler. Genellikle yüksek güç çıkışları için birleştirilmiş kavite yapısı kullanılmaktadır. Çünkü birleştirilmiş kavite yapılarının termal dayanımları oldukça yüksektir. Geniş bant genişliği ve düşük güç çıkışları istendiğinde helis yapılarının kullanımları daha yaygın olmaktadır. Bükülmüş dalga kılavuzu sistemleri genellikle THz yapıları için kullanılmaktadır.



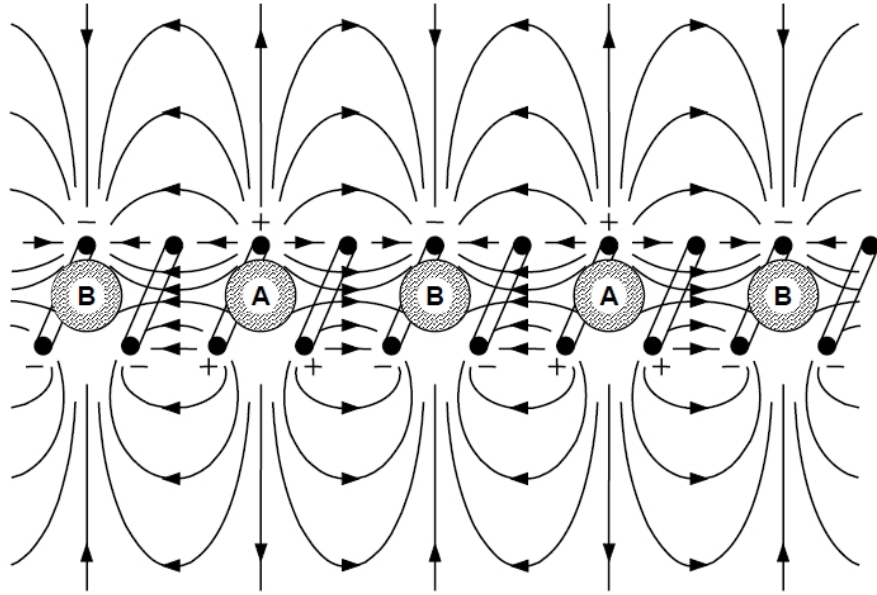
Şekil 2.26. Dielektrik destekli helis yapısı (Kesari ve Basu, 2017)

Şekil 2.26'da dielektrik destekli helis yapısı gösterilmektedir. Yapıdaki metal çıkıntılar bant genişliğini kontrol için kullanılmaktadır. Lindenblad tarafından icat edilen TWT, yavaş dalga devresi olarak bir helis kullanmıştır (Lindenblad, 1942). TWT gelişiminin şekilleneceği yılları boyunca, yüzlerce başka ilerleme yapısı araştırıldı, ancak geniş bir bant aralığı gerektiğinde helis yapısı tercih edilen bir RF devresi olmuştur. Mikrodalga tüpleri arasında bant genişliğinin yüksek olması en önemli gereksinimlerden biridir. Çünkü çalışma frekansındaki genişlik sistemin kullanım alanı yelpazesini büyütmemektedir.



Şekil 2.27. Bir zemin düzleminin üzerindeki tek telli bir iletim hattı için RF sinyalinin elektrik alan modeli (Gilmour, 2011)

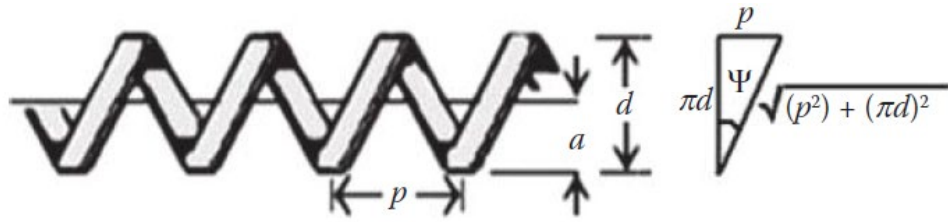
Şekil 2.27’de tek telli bir iletim hattı üzerinden geçen RF dalgasının elektrik alan çizgileri belirtilmiştir. Burada RF sinyalinin manyetik alan modeli gösterilmemiştir ve dikkate alınmamaktadır. Çünkü bir mikrodalga tüpündeki elektron demeti üzerindeki RF manyetik kuvvetleri, elektrik alanı tarafından üretilen kuvvetlerle karşılaştırıldığında önemsiz kalmaktadır. İletim hattındaki yayılma ışık hızında gerçekleşmektedir.



Şekil 2.28. RF sinyalinin helis üzerindeki elektrik alan çizgileri (Gilmour, 2011)

Şekil 2.28’de helis yapısına uygulanan RF dalgasının elektrik alan çizgileri gösterilmiştir. Burada RF dalgası helisin sarmal kısımlarından ışık hızı ile hareket eder. Fakat aksenal yönde ışık hızından daha yavaş hızlarda ilerleme gerçekleştirir. Aksenal yöndeki hız bileşeni faz hızı olarak tanımlanır.

Elektron demeti aynı ekseninde yer alan bileşenler dikkate alınmaktadır. Burada sinyalin polaritesi sarmal iletken boyunca her yarım dalgada bir değişecektir. Şekil 2.28'de görüldüğü gibi her bir yarım dalga boyunun tamamlanması için iki tam dönüş gereklidir. Elektrik alan çizgileri pozitif yük bölgelerinden negatif yük bölgelerine doğru akmaktadır. Bir elektron demeti sarmalın eksenini boyunca içeriye gönderildiğinde, RF sinyalinin aksenal elektrik alanı bileşenleri bazı elektronları hızlandırır ve bazılarını yavaşlatır. Şekil 2.28'de elektronlar üzerindeki kuvvetler A bölgelerine yakın, B bölgelerine uzak olacaktır.



Şekil 2.29. Helis yapısının geometrik olarak çözümlenmesi (Khan, 2014)

Şekil 2.29'da Kompfner tarafından kullanılan ilk yavaş dalga devresi gösterilmiştir. Elektrodinamik yavaş dalga yapısı olarak helis teorisi, TWT'lerin icadından çok önce A. Sommerfeld tarafından geliştirilmiştir. Bu yapının en basit modelinde RF dalgası, ışık hızında bir tel boyunca ilerler ve böylece faz hızı ile aksenal yönde hareket etmiş olur. Bu faz hızı ifadesi aşağıdaki denklemde belirtilmiştir.

$$V_{ph} = c \sin \psi \quad (2.11)$$

$$\sin \Psi = \frac{p}{2\pi a} \quad (2.12)$$

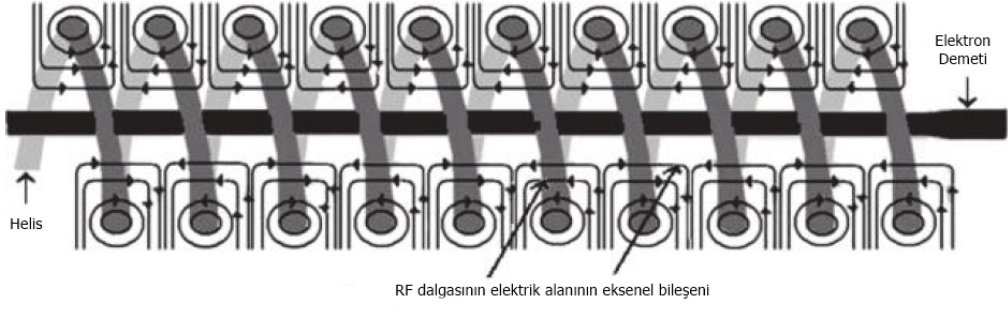
Yukarıdaki denklemde  $\psi$  helis eğim açısını,  $c$  ışık hızını,  $a$  helisin iç yarıçapını,  $d$  helis çapını,  $p$  iki sarmal arasındaki mesafeyi temsil etmektedir. Elektronlar için kinetik enerji ifadesi yeniden düzenlenerek yazıldığında aşağıdaki denklem elde edilir.

$$V = \sqrt{\frac{2eV_a}{m}} = 0,5932 \times 10^6 \sqrt{V_a} \text{ m/s} \quad (2.13)$$

Yukarıdaki denklemde  $V$  elektronların hızını,  $e$  elektronların yükünü,  $m$  elektronların kütlesini,  $V_a$  elektronların hızlanma gerilimini temsil etmektedir. Örnek olarak denklem (2.13) kullanılarak 5kV hızlanma potansiyeline sahip bir elektron demetinin hızının helis yapısı içerisinde  $4.2 \times 10^7$  m/s hız ile hareket ettiği sonucu ortaya çıkar. Normal şartlarda RF sinyalinin hızı  $3 \times 10^8$  m/s'dir. Böylece, iki hız arasında çok fark ortaya çıkar. Elektron ışınının hızının ışığın hızına yükseltildiği hiçbir yöntem yoktur. Mümkün olduğu varsayılsa bile, görelilik kuramı göz önüne alındığında, elektron kütlesi hız ile artar ve hızı ışık hızına yaklaştıkça kütlesi sonsuza yaklaşır. Böylece, ışık hızı seviyesindeki elektron hızlarına ulaşmak, durumu karmaşılaştırır. Bununla birlikte RF sinyalinin hızı elektronların hızı seviyesine getirildiği zaman RF sinyalinde güçlenme mümkün olabilmektedir. Normalde yavaş dalga yapısı kullanılmazsa RF sinyali ışık hızında hareket eder. Fakat helis yapısı ile ilerleyen sinyal helisin özelliklerine bağlı olarak ışık hızından daha düşük hızla hareket eder. Helis boyunca ilerleyen dalga yavaş dalga olarak bilinir. Denklem (2.14)'da sinyalin güçlendirilmesi için gereken koşul gösterilmiştir.

$$V = \frac{cp}{2\pi a} = \sqrt{\frac{2eV_a}{m}} \quad (2.14)$$

Farklı geometrilerdeki yavaş dalga yapılarının seçimi, istenen kazanç, bant genişliği ve güç özelliklerine bağlı olarak değişir. Denklem (2.11)'e göre faz hızı frekansa bağlı değildir. Bu çok önemli bir özelliktir. Çünkü elektron demetinin ve RF dalgasının eşzamanlılığı tüm frekanslarda desteklenecektir. Bu durum TWT'lerin geniş bant aralığına sahip olduklarını göstermektedir. Faz hızı, düşük çalışma frekanslarında artar. Helis yapısı doğal olarak rezonanssız bir yapıdır ve çok geniş bant aralığı verir. Helis yapısındaki sarmalların dönüşleri birbirlerine çok yakındır. Helisin sarmal çapı, merkezinde yüksek bir RF alanı içerecek şekilde yüksek frekanslarda azaltılmalıdır. Çapın azaltılmasıyla, elektron demetinin odaklanması zorlaşır ve yüksek güçlü bir elektron demeti helis tarafından kesilirse, erimesi muhtemeldir.

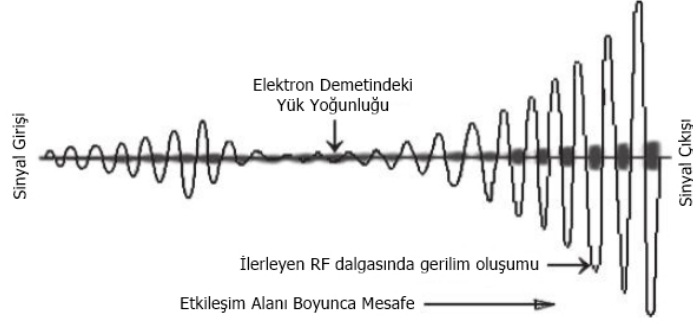


Şekil 2.30. Helis üzerinde ilerleyen RF dalgasının elektrik alanı (Khan, 2014)

Şekil 2.30'da helis üzerinde ilerleyen RF dalgasının elektrik alanının aksenal bileşeni gösterilmiştir. Elektron demeti ile RF dalgasının aksenal bileşeninin birbirlerine paralel oldukları görünmektedir. TWT sistemlerinde giriş sinyali güçlendirilirken, helis yapısında ilerleyen RF dalgasının elektrik alanının aksenal bileşeni ile elektron demeti arasında bir etkileşim yaşanır. Bu etkileşim, elektron demetinden RF dalgasına doğru bir enerji aktarımıyla sonuçlanır. Bu nedenle helis yapısının kolektör ucuna doğru ilerlerken sinyal güçlenmesi artar. TWT sistemlerinde helis yapısı katoda göre pozitifdir (Khan, 2014). Kolektör ise bütün sisteme göre daha pozitifdir. Bunun sebebi elektronları çekmektir. Kolektör tarafından çekilen dar ve doğru odaklanmış elektron demeti yüksek hız kazanır. Giriş sinyali helisin giriş ucuna bir dalga kılavuzu veya koaksiyel hat üzerinden uygulanır. Genellikle düşük ve orta güçteki TWT'lerde giriş sinyali SMA tipi konnektör ile uygulanmaktadır. Çalışma frekanslarına ve dizayna bağlı olarak dalga kılavuzu girişli TWT'ler de mevcuttur. Çıkış sinyali portları da aynı şekilde SMA veya dalga kılavuzu olabilmektedir. Elektron demeti RF alanı içerisinde ilerlerken kümelenme yada demetleme dediğimiz olay oluşur. Bu durum elektron demetinin hızının RF alanının aksenal hızına eşit olması sonucu oluşur. Aynı zamanda RF alanı elektronların hızını modüle eder. Oluşan bu kümelenme, helis boyunca ileriye doğru eksen yönünde ilerledikçe daha fazla olma eğilimindedir. Böylece bu döngü yüksek kazanç ve minimum gürültü ile sonuçlanır.

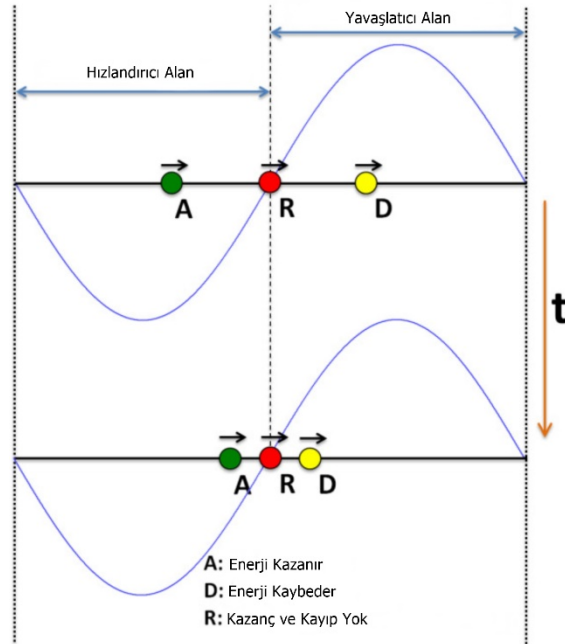
Eş zamanlı olarak RF sinyali üstel olarak güçlenir. Katottan rastgele çıkan elektronlar, giriş sinyaline bağlı olarak helisin girişinde zayıf bir RF alanı ile karşılaşılırlar.





Şekil 2.31. TWT boyunca sinyalin yükseltilmesi ve elektron kümelenmesi (Khan, 2014)

Şekil 2.31'de TWT yapısındaki sinyal güçlenmesinin ve elektronların nasıl kümelendiği gösterilmiştir. Tanım olarak, "hız modülasyonu" terimi, bazı elektronların hızlandırıldığı, bazılarının ise yavaşlatıldığı anlamına gelmektedir. Böyle bir olay, elektron demeti içinde kümelerin oluşmasına neden olur. Bu nedenle elektron demetinin akımı RF sinyali ile modüle edilir. Elektron kümeleri, helis'den ilerleyen yavaş dalga ile reaksiyona girerek, elektron demetinden sinyale net bir enerji aktarımına ve sonuç olarak amplifikasyona neden olur. Bu etkileşimde rezonans yapıları bulunmadığından, geniş bant aralığında amplifikasyon elde edilir.



Şekil 2.32 Elektron kümelerinin oluşması (Kesari ve Basu, 2017)

Şekil 2.32'de TWT'deki kümelenme mekanizması gösterilmiştir. Tipik olarak, biri 'A' ve diğeri 'D' de olmak üzere iki elektronun, 'R' referans elektronunun etrafında, hepsi aynı yönde soldan sağa doğru hareket ettiği gösterilmiştir. Zaman geçtikçe, A'daki elektron hızlanır ve kinetik enerji kazanır. Benzer şekilde D'deki elektron yavaşlar ve kinetik enerjisi kaybeder. R'deki referans elektronu ne hızlandırılır ne de yavaşlatılır ve dolayısıyla kinetik enerjisi kazanmaz veya kaybetmez. Helis TWT'ler tipik olarak 650 MHz ile 10 GHz frekans aralığında yüz ile bin watt arasında ortalama veya sürekli RF gücü sağlarlar. Çalışma frekansı arttıkça çıkış güçleri düşmektedir. Örneğin; 50 GHz frekansındaki bazı TWT'ler 10 W çıkış gücüne sahiptirler. Birleştirilmiş kaviteli TWT'ler 750 MHz seviyesinde binlerce watt, 100 GHz seviyesinde yüzlerce watt çıkış sinyali verebilmektedir (Gilmour, 2011). Helis yapıları TWT'lerde metalik vakum kılıfı ile yavaş dalga yapısını elektriksel olarak izole etmek için dielektrik malzemeler kullanılmaktadır. Bu malzemeler farklı geometrik şekillere sahip çubuklar şeklindedir. Dielektrik malzeme sayesinde içerisinden elektron demeti geçirilen yavaş dalga yapısının aşırı ısınması önlenmiş olur. Aynı zamanda bu dielektrik malzemesi sayesinde helis yapısı merkezlenmiş olur. Bu aynı zamanda cihazın imalatını kolaylaştırmaktadır (Harper ve Puri, 1986). S bandında çalışan bir helis yapıları TWT'de dielektrik destek çubuklarının yerleştirilmiş hali Şekil 2.33'te gösterilmiştir.

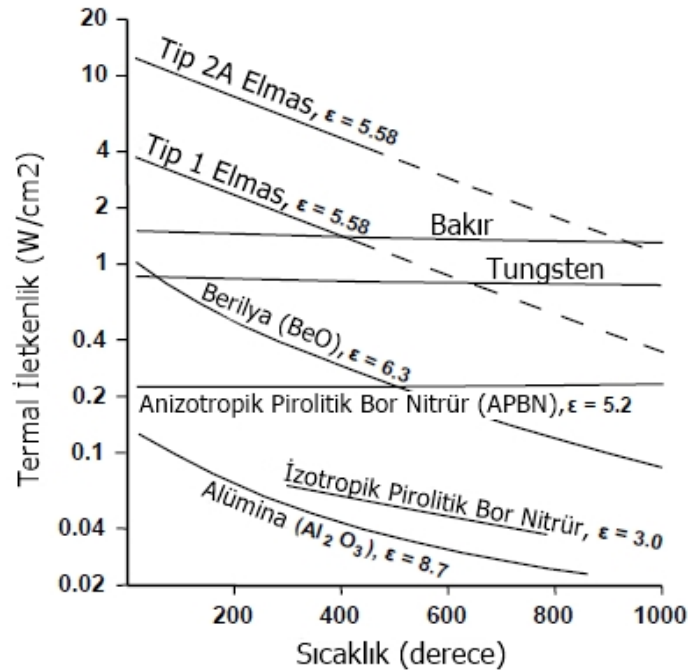


Şekil 2.33. Seramik destek çubukları ile helis yapısının merkezlenmesi (Song vd. 2013)

Helis yapıları TWT'lerde genellikle üç adet destek çubuğu kullanılmaktadır. Bunlar birbirleriyle 120° derece açı yapacak şekilde konumlandırılırlar.

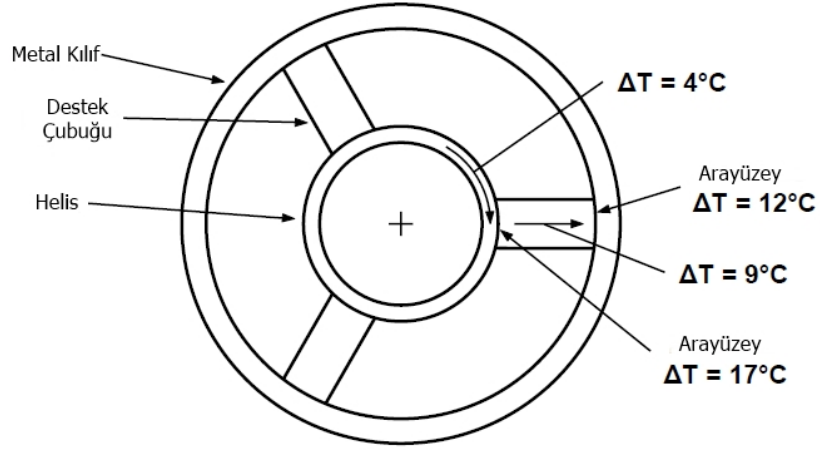
Geometrik şekil olarak genellikle dikdörtgen veya silindirik yapılar kullanılmaktadır.

Malzeme olarak berilyum oksit (BeO), alümina ( $Al_2O_3$ ) ve boron nitrit (BN) kullanılmaktadır. Bu malzemelerin termal dayanımları ve termal iletkenlikleri oldukça yüksektir. Helis genellikle tungsten (W) ve molibden (Mo) tellerden yapılmaktadır. Yüzey iletkenliğinin yüksek olması için telin yüzeyi bakır (Cu) ile kaplanmaktadır. Bu yöntemle RF sinyalinin helis yüzeyi üzerindeki kayıplar minimize edilmiş olur. Aynı zamanda destek çubukları ile helis arasında oluşan termal dirençlerin azaltılması sağlanmış olur.



Şekil 2.34. Bazı metal ve seramiklerin termal iletkenlikleri (Jacquez ve Scott, 1981)

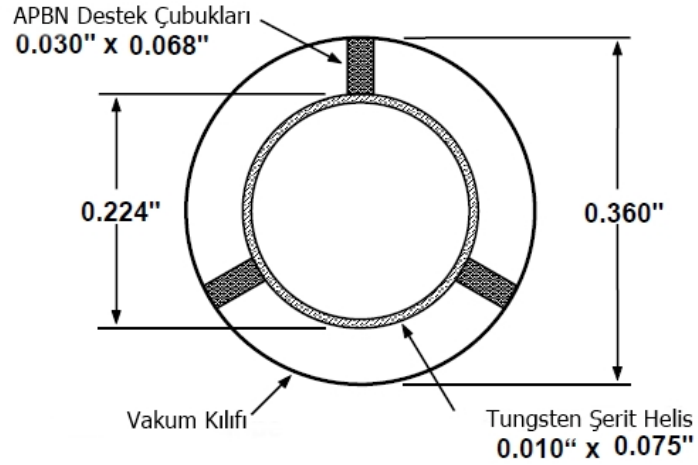
Şekil 2.34'de TWT sistemlerinde kullanılan metal ve seramik malzemelerin sıcaklık değişkenine bağlı olarak termal iletkenlik değerleri gösterilmiştir. Grafikteki seramik malzemeler TWT sistemindeki helis destek çubuklarında kullanılmaktadır.



Şekil 2.35. Tungsten helisli ve APBN destek çubuklu bir TWT sisteminde 1W güç değerinde oluşan sıcaklık dağılımları (Scott, 1978)

Yüksek ısı iletkenlikli seramiklerin kullanımıyla, destek çubukları arasındaki sıcaklık düşüşü, yüksek güçlü helis TWT'lerde ciddi bir problem değildir.

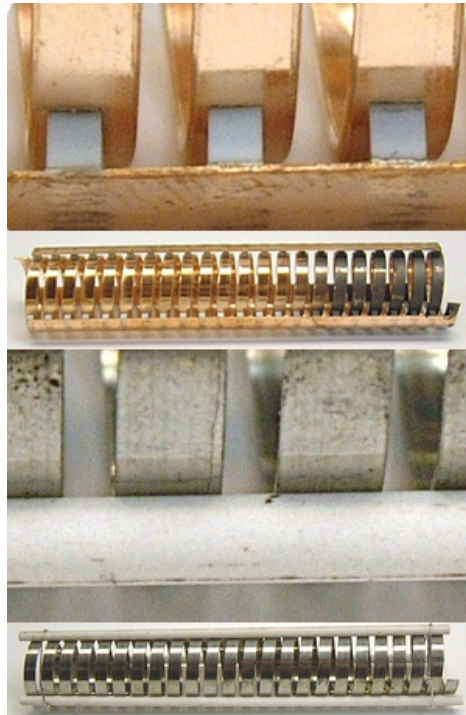
Bunun yerine başlıca problemler, helis ve destek çubukları arasındaki ve destek çubukları ile metalik kılıf arasındaki ara yüzeylerin termal dirençleridir.



Şekil 2.36. 10 kW çıkış gücünde ve 3-6 GHz bant genişliğindeki bir TWT'nin kesiti (Alan, 1978)

Destek çubukları yerine helisi tamamen çevreleyen tek parça bir dielektrik silindir mükemmel destek ve soğutma sağlayabilir. Ne yazık ki, uygun seramik malzemelerin dielektrik sabitleri yüksektir. Sonuç olarak, tek silindirin kullanılması, helisin devre etkileşim empedansını ciddi ölçüde azaltacaktır.

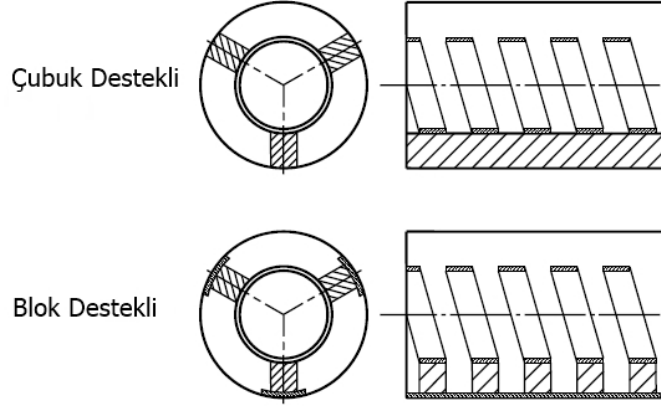
Aslında, bir seramik destek yapısının yük etkisini azaltmak için, kullanılan seramik malzemenin miktarını en aza indirmek gerekir. Sonuç olarak, Şekil 2.36'da gösterildiği gibi ince, dikdörtgen destek çubukları sıklıkla kullanılmaktadır. Yani helis ile destek çubuklarının temas alanlarının en aza indirilmesi istenmektedir. Üreticiler bu konuda ciddi hassasiyete sahiptirler. Destek çubuğu ara yüzlerindeki büyük termal düşüşler nedeniyle, yüksek güçlü helis TWT'ler de helis ve destek çubuğu yapıları arasındaki termal ara yüz dirençlerini en aza indiren teknikler kullanılmaktadır. Özellikle sert lehimleme ve kaplama tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.37'de şerit tipli helis yapısında destek çubuklarının sert lehimleme ile birleştirilmesi gösterilmiştir. Alt resimdeki birleştirme klasik destek çubuklu sistemlere aittir. Bu yöntemle helis yüzeyi ile destek çubukları arasındaki termal dirençler minimize edilmektedir. Aynı zamanda helis empedansındaki düşüşler engellenmektedir.



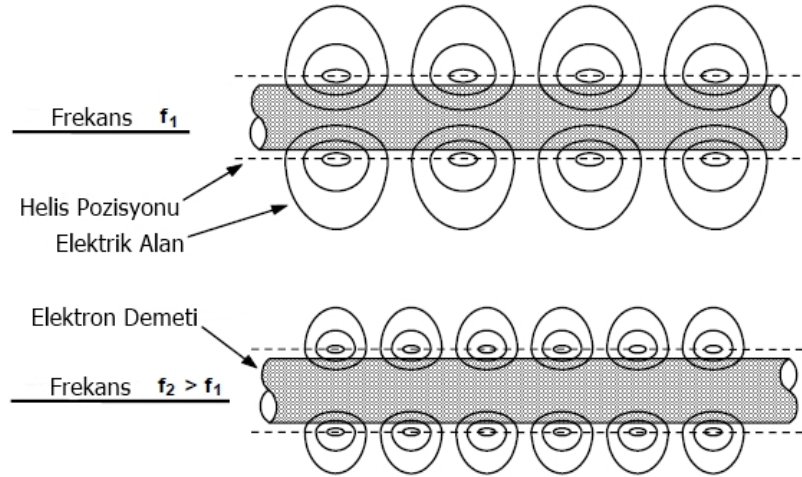
Şekil 2.37. Şerit tipli bir helis yapısında destek çubuklarının sert lehimleme ile tutturulması (Pendelum, 2018)

Şekil 2.38'deki blok destekli yapı ile standart yapının karşılaştırılması gösterilmiştir. Seramik bloklar, helise lehimlenir. Seramik blokların kullanılması, çubuklarla ilişkili termal genişleme problemlerini ortadan kaldırır (Hiramatsu, 1979).

Blok destekli yapının ek avantajları, dielektrik yükün azaltılmasını (daha yüksek etkileşim empedansı) ve dielektrik malzemenin faz hızı üzerindeki yavaşlatma etkisini düşürmektir.



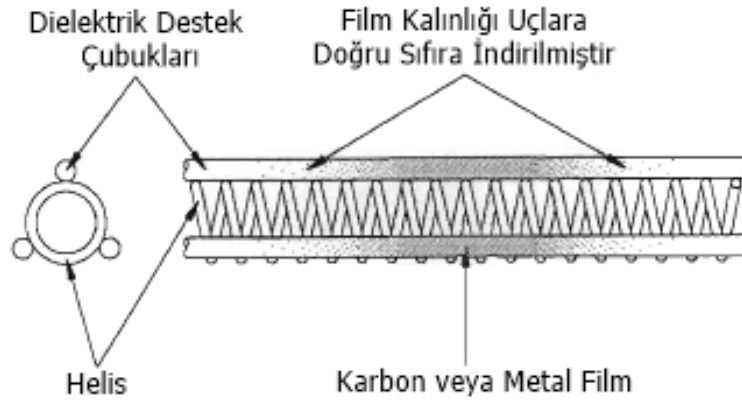
Şekil 2.38. Çubuk ve blok destekli helis yapılarının karşılaştırılması (Hiramatsu, 1979)



Şekil 2.39. Helis yapısında frekansın artması ile elektrik alandaki değişim (Gilmour, 2011)

Şekil 2.39'da aynı elektron demeti akımına sahip iki helis yapısında frekansın artması ile elektrik alanı çizgilerinde küçülme gösterilmiştir. Sonuç olarak, elektrik alanın elektron demeti ile etkileşimi azalır ve güç kazancı düşer. Bu durum TWT sistemlerinde bant genişliğini sınırlayan bir faktördür. Yani TWT her frekans değerinde amplifikasyon gerçekleştiremez. TWT sistemlerinde bant genişliğini etkileyen bir başka faktör ise dispersiyondur. Özellikle düşük ve orta güç TWT cihazlarında kullanılan helis destek çubukları en önemli dispersiyon

faktörüdür. Bant genişliğini ve aynı zamanda helisin güç kapasitesini sınırlayan çok ciddi başka bir faktörde,  $\beta_p = \pi$  radyanlarında meydana gelen geri dalga salınımlarıdır (BWO). Dispersiyon ve salınımları kontrol etmek için herhangi bir teknik kullanılmazsa, helis TWT'nin bant genişliği en fazla yaklaşık 1 oktav ile sınırlıdır. Dispersiyon kontrolü ve BWO bastırılması ile bant genişliği 2 veya daha fazla oktavlara kadar arttırılabilir (Gilmour, 2011). TWT sistemlerinde oluşan BWO 'ları sönmölemek için helis destek çubuklarının merkezleri zayıflatıcı malzeme ile kaplanmaktadır. Bu kaplama malzemeleri genellikle karbon, elmas, nikel, demir ve tantalyum 'dan oluşmaktadır (Antonsen vd. 2002). Geri yansıyan dalğanın zayıflaması, geri beslemeyi önemli ölçüde zayıflatır. Öte yandan, ileri dalga da zayıflatılır. Zayıflatıcıdan sonra, ileri dalğanın genliği sifıra yakın olabilir. Ancak, zayıflatıcıdan önce elektron demetinin kümelenmesi, zayıflatıcıdan sonra amplifikasyonun yoğunlaşmasına yol açar. Bu yöntemin bir dezavantajı, yavaş dalga yapısının geri kalanı ile zayıflatıcı empedansını eşleştirmek için uzun bir zayıflama bölümüne ihtiyaç duyulmasıdır. Ayrıca zayıflatıcı kaplama tekniği, yüksek güçlü TWT'ler için uygun değildir.

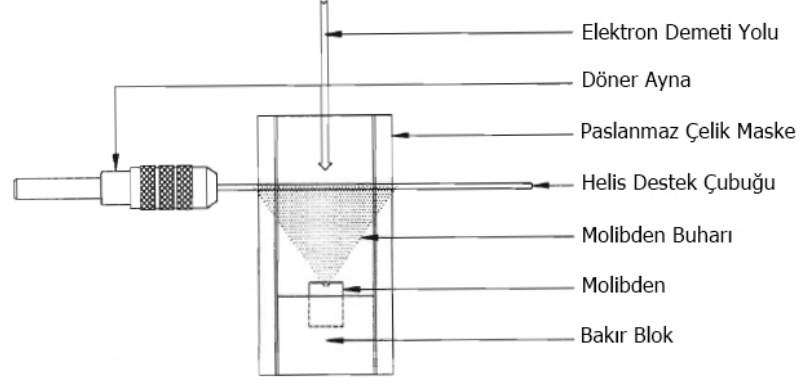


Şekil 2.40. Helis yapılu bir TWT'de zayıflatıcı kaplaması (Vassilopoulos, 1994)

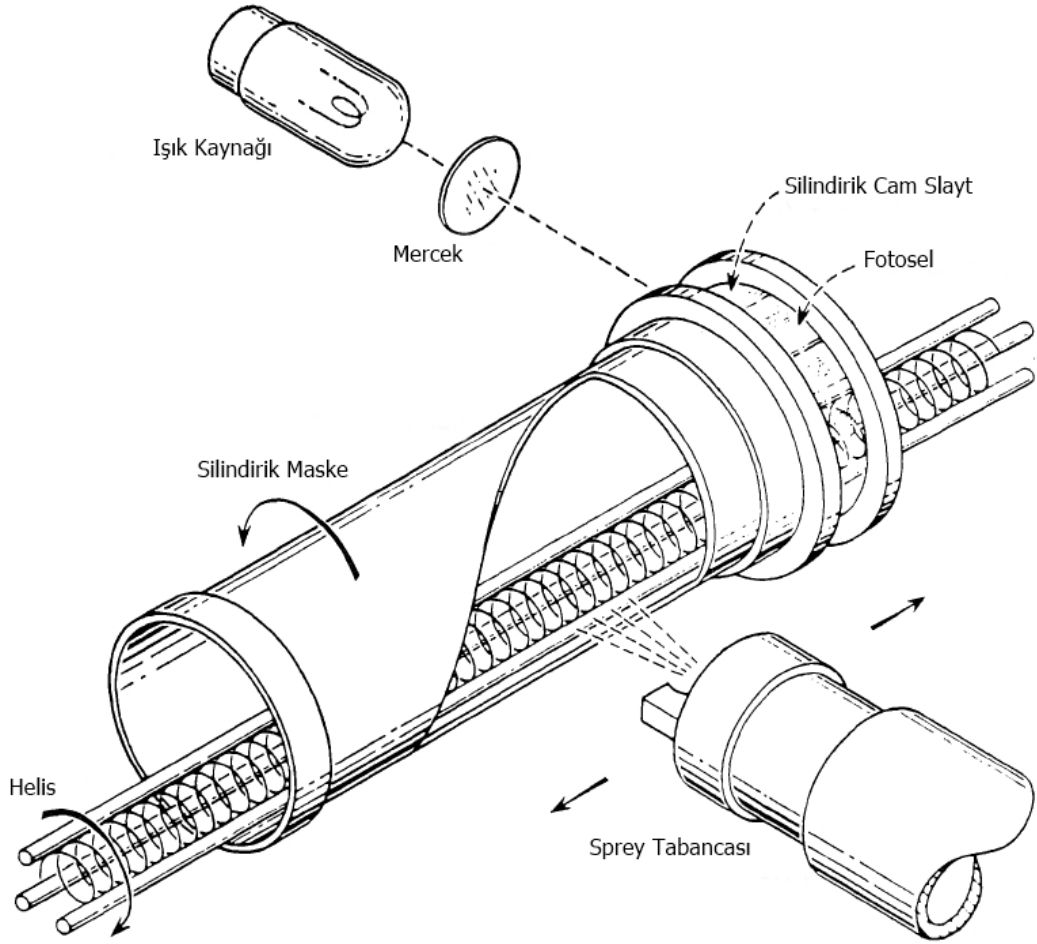
Şekil 2.40'da helis yapılu bir TWT sisteminde dielektrik destek çubukları üzerindeki zayıflatıcı kaplaması gösterilmektedir. Dikkat edilecek olursa kaplama kalınlığı merkezde maksimum seviyede olmak üzere uçlara doğru gidildiğinde basamaklı bir şekilde sifıra yaklaşmaktadır (Iverson, 1956). Bu durum, geniş bir frekans aralığında iyi bir empedans uyumuna neden olur.

Yüksek dirençli filmler, dielektriklerin ince metal veya karbon katmanları ile kaplanmasıyla elde edilebilir. Cam, silika, mika ve alümina uygun dielektriklerdir. Buharlaştırma yolu ile oluşturulan metal filmler RF saçırma ve sprej gibi tekniklerle hazırlanır. Kaplama teknikleri uygulanırken kalınlık ölçümlerinin kontrol altında tutulması oldukça önemlidir. Çünkü kaplama kalınlığındaki tolerans miktarı belirli bir değerin altında veya üstünde farklı zayıflatma etkilerine sebep olacaktır. Bu durum sinyal güçlenmesinde bozulmalara neden olacaktır. Karbon ile kaplama, hidrokarbonların termal olarak parçalanması ve bir kolloidal grafit süspansiyonunun sprej yapılması ile mümkündür (Calame ve Lawson, 1991). Kolloidal grafitin iyi bilinen iki sulu süspansiyonu "Aquadag" ve "Hydrokollag" ile iyi bilinen bir mineral yağ süspansiyonu olan "Oildag" dır (Espe, 1966). Birim uzunluk başına maksimum zayıflama için optimum bir direnç değeri vardır (Jain ve Basu, 1988). Karbon film zayıflatıcıları sadece düşük güç kaybı için kullanışlıdır. Metal film zayıflatıcıları karbon zayıflatıcılardan biraz daha fazla güç harcayabilir, ancak yüksek güç kaybı için büyük miktarda kayıp malzemelerine ihtiyaç vardır. Gözenekli seramik gövdelerin, hidrokarbonların termal olarak parçalanmasıyla üretilen karbon ile kaplama en temel yöntemlerdendir. Zayıflatıcı etkisinin şiddeti, biriken karbon miktarına göre belirlenir. Karbon ile kaplanmış gözenekli seramiklerin bir dezavantajı, biriken karbonun su veya oksijen ortamında ısıtılmamalıdır. Çünkü bu durum karbonların sökülmesine neden olmaktadır. Gözenekli seramiklerde gaz salınımları vakum ortamında sorunlara neden olabilir ve asla gres, çözücü veya buharları ile temas etmemelidirler. Karbon-seramik-metal karışımları, çok daha düşük gaz salınımı oranlarına, daha iyi termal iletkenliğe ve su buharı tarafından saldırıya daha az duyarlı olmalarına bağlı olarak büyük ölçüde gözenekli seramiklerin yerini almışlardır. Bu karışımların dirençleri, reçetelerine göre değişir. Bu tür karışımların örnekleri arasında "Ceralloy", alümina ve silikon karbid gibi sıcak preslenmiş, gözeneksiz bir seramik karışımı ve "Caberlox" yüksek bir termal iletkenlik karbon-berilya karışımıdır (Calame ve Lawson, 1991).





Şekil 2.41. Elektron demeti yöntemi ile molibdenin destek çubuğu üzerine kaplanması (Vassilopoulos, 1994)

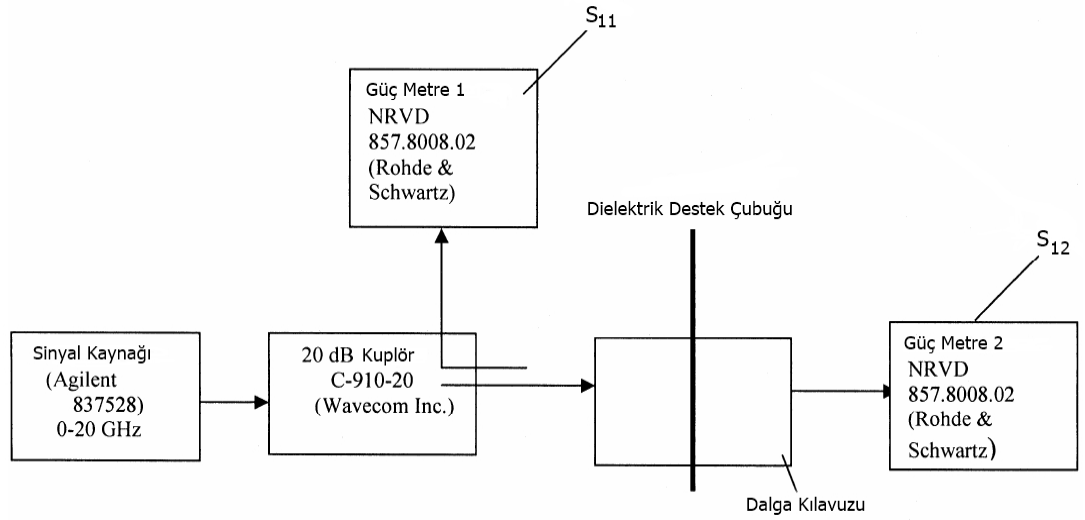


Şekil 2.42. Aquadag spreyi yöntemi grafit kaplaması (Bodmer vd. 1963)

Destek çubukları genellikle heptan ( $C_7H_{16}$ ) ve benzen ( $C_6H_6$ ) gibi hidrokarbonlar kullanılarak pirolitik biriktirme yöntemi ile karbon kaplanmaktadır (Kumar vd. 2007). Yüksek güçlü zayıflatıcılar, bir helisin etrafına tüplerin veya kaygan seramik halkaların takılmasıyla yapılabilir (Pierce, 1950).

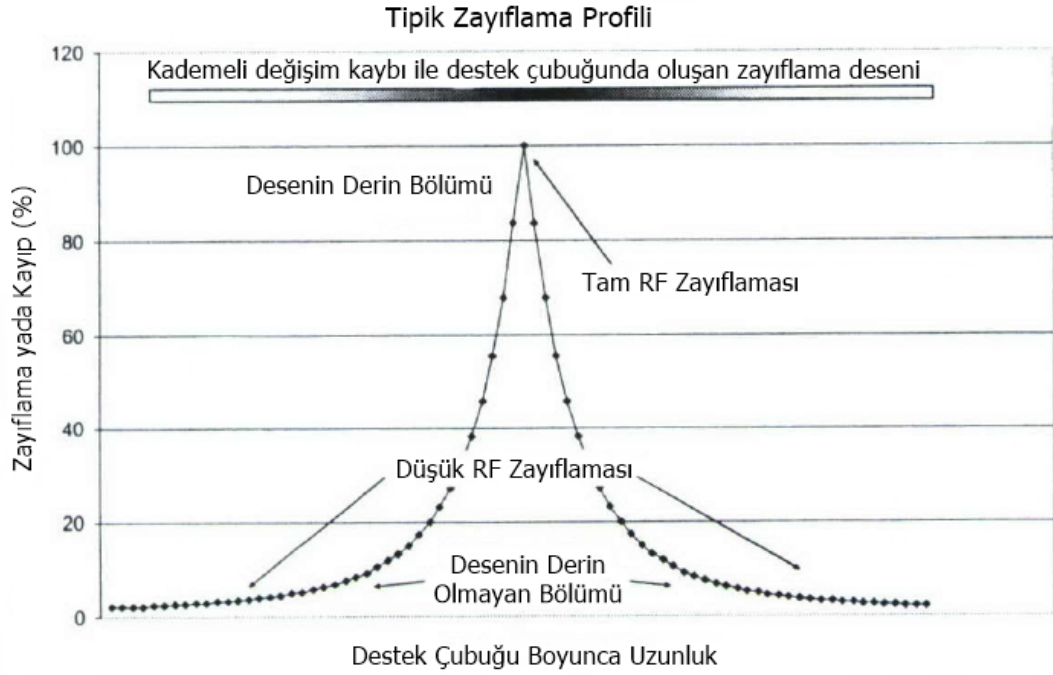


Şekil 2.43. Molibden ile kaplanmış seramik destek çubukları (Vassilopoulos, 1994)



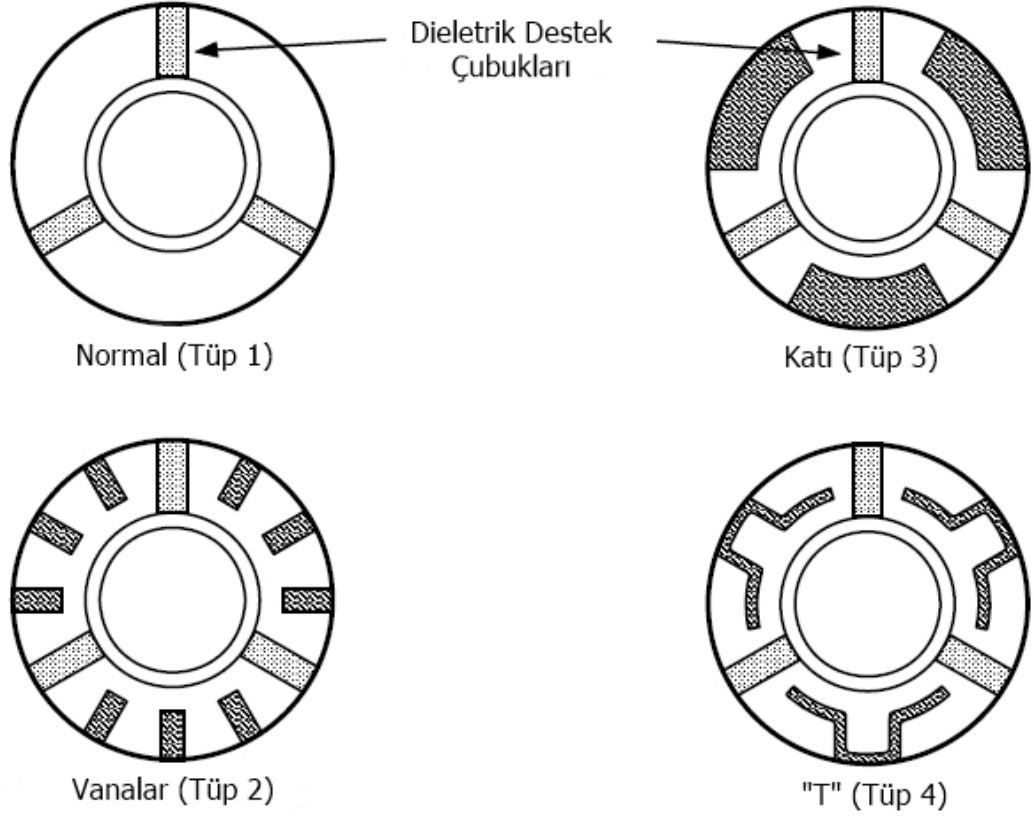
Şekil 2.44. Zayıflatıcı seviyesini ölçmek için kurulan deney düzeneği (Kumar vd. 2007)

Şekil 2.44'te destek çubuğundaki kaplamanın RF üzerindeki zayıflatıcı etkisini ölçmek için kurulan deney düzeneği verilmiştir. Destek çubuğu dalga kılavuzu içerisinde yukarı-aşağı hareket ettirilerek ölçüm sağlanmaktadır. Çıkan zayıflatma değerleri dB cinsinden ifade edilir. Bu ölçümler yapılırken belirli bir frekans değeri seçilir ve işlem başlatılır.

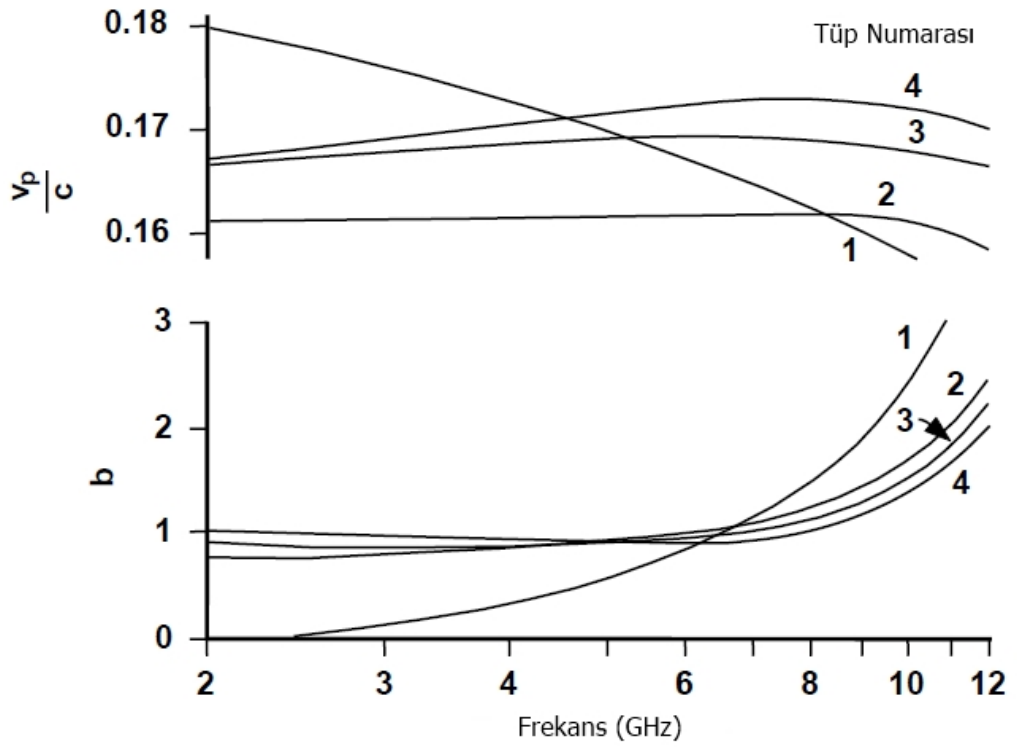


Şekil 2.45. Helis destek çubuğundaki zayıflama deseninin profili (Feicht vd. 2007)

TWT sistemlerinde oluşan dispersiyonları engellemek ve farklı frekans aralıklarında çalışmalarını sağlamak için destek çubuklarının arasındaki boşluklara vanalar yerleştirilmektedir. Bu vanalar anizotropik yükleme elemanları olarak bilinirler. Bu elemanlar genellikle pervane ve T şeklinde olurlar. Şekil 2.47'de gösterilenler Şekil 2.46'deki üç konfigürasyon için frekansın fonksiyonu olarak faz hızı ve Pierce hız parametresidir. 1 numaralı tüp ile frekans azaldıkça faz hızı artar ve b azalır. 2 numaralı tüpte, kanatlar tüm frekans aralığı boyunca neredeyse düz bir faz-hız karakteristiği üretmektedir. 3 ve 4 numaralı tüplerde, T-şekilli segmentler negatif dağılım karakteristikleri üretmiştir. Yani, düşük frekanslarda faz hızı azalmaktadır.

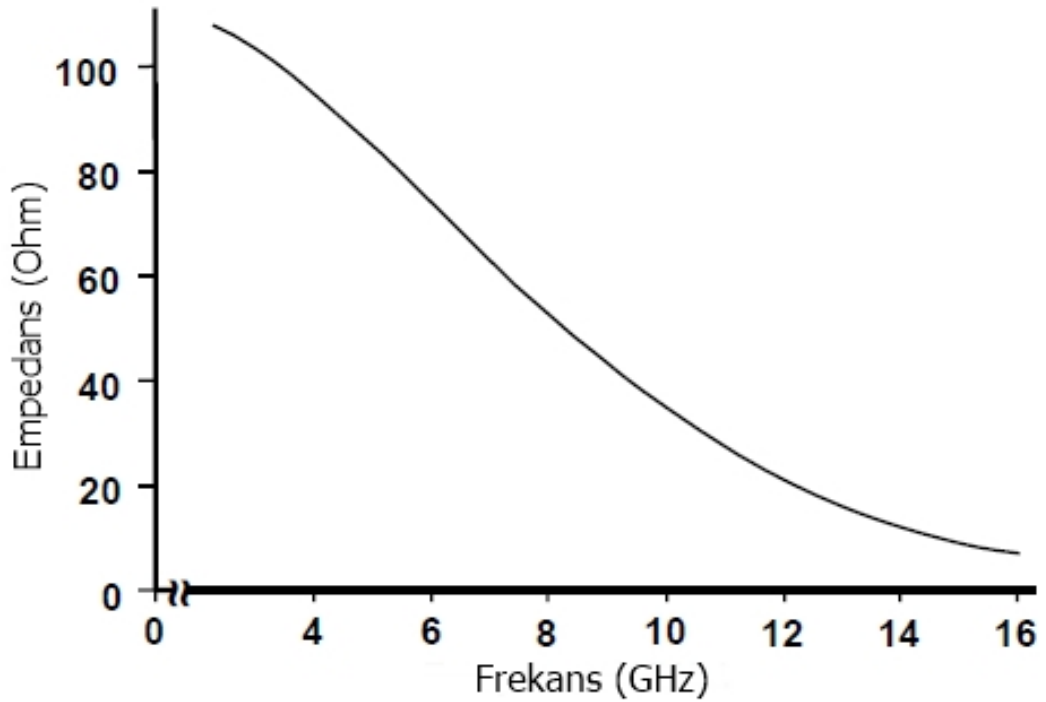


Şekil 2.46. Dispersiyon kontrol teknikleri (Putz ve Cascone, 1979)



Şekil 2.47. Frekans fonksiyonları olarak normalleştirilmiş faz hızı ve Pierce hız parametresi (Putz ve Cascone, 1979)

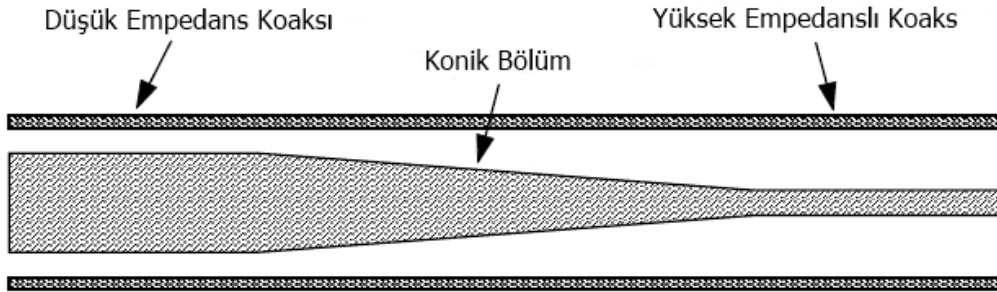
TWT cihazlarında sinyal giriş ve çıkışlarını sağlayan konnektörlerin dizaynı önemli bir yer tutmaktadır. Konnektörler frekans ve güç aralıklarına göre değişiklik göstermektedir. Genellikle düşük güçteki TWT'lerde SMA tipi konnektör kullanılmaktadır. Yüksek güçlü sistemlerde ise dalga kılavuzları tercih edilmektedir. TWT sistemlerindeki iletim hatlarında empedans  $50\Omega$  olarak belirlenmiştir. Konnektör dizaynları yapılırken bu değer baz alınmaktadır. Bir helisin empedansı Şekil 2.48'de gösterildiği gibi frekansa göre değişmektedir. Bu örnekte, helis yapısı 4.8 ile 9.6 GHz (1 oktav) arasında çalışmak üzere tasarlanmıştır. Bandın merkezinde, empedans yaklaşık  $50\Omega$ 'dur. Bandın alt ucunda, empedans  $80\Omega$ 'un üzerine çıkarılmıştır ve yüksek uçta empedans yaklaşık  $35\Omega$ 'dur. Bir oktavdan daha fazla çalışabilen TWT'ler daha fazla empedans varyasyonlarına sahiptir. Sonuç olarak, bu TWT'lerin giriş ve çıkışlarındaki empedans geçişleri, helis empedansındaki geniş varyasyonu eşleştirebilmelidir.



Şekil 2.48. Bir oktav bant genişliğindeki TWT için helis empedansı (Gilmour vd. 1979)

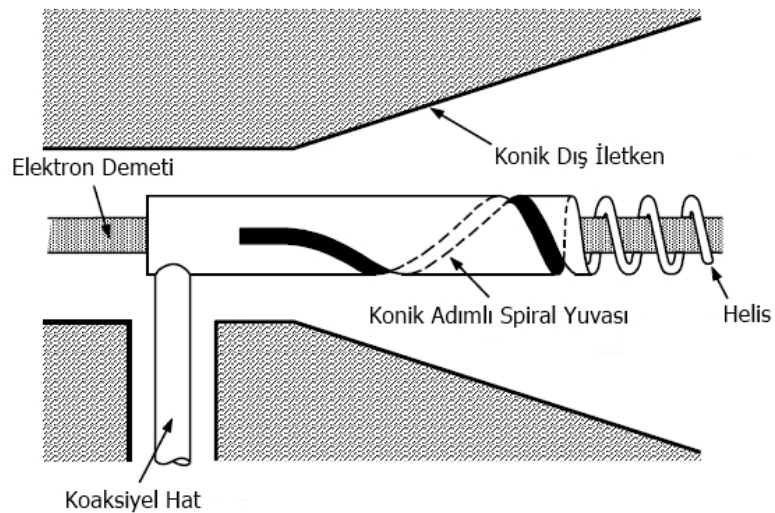
Geniş bant geçişleri için kullanılan tasarımlar, Şekil 2.49'da gösterilen fikre dayanmaktadır. Burada bir koaksiyel hattın konik kesiti, soldaki koaksın düşük empedansını sağdaki koaksın yüksek empedansına uydurmak için kullanılır.

Konik geçiş uzunluğunun sinyalin dalga boyuna göre uzun olması durumunda mükemmel bir empedans uyumu gerçekleştirilir.

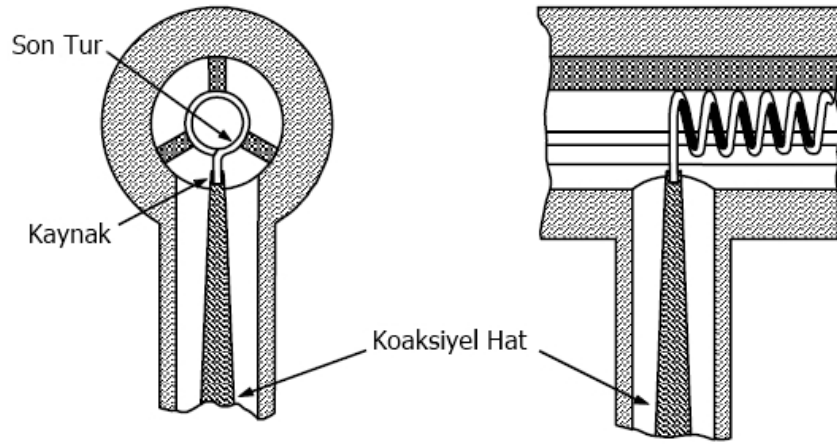


Şekil 2.49. Düşük empedanslı koaksiyel hattı yüksek empedanslı bir hatta eşleyen konik geçiş (Gilmour, 2011)

Bir TWT'de, Şekil 2.49'da gösterilen geçiş ile çok geniş bantlı bir empedans uyumu yapılabilir. Geometride kademeli bir değişiklik yapılır, böylece helis yavaşça bir koaksiyel hatta dönüşür. Genel geçiş dalga boyuna kıyasla uzun olduğu sürece, mükemmel bir empedans uyumu mümkün olacaktır. Pratikte, Şekil 2.49'da gösterilen geçişlerin uzun olması çok ciddi dezavantajlara sahiptir. Bu yöntem kullanılırsa, bir TWT'nin uzunluğu ve ağırlığı artacaktır. Pratikte, geçişler normal olarak sinyal helis 'den çıkarıldıktan sonra yapılır. Örneğin, koaksiyel hattın merkez iletkeni Şekil 2.50'de gösterildiği gibi incelenebilir.



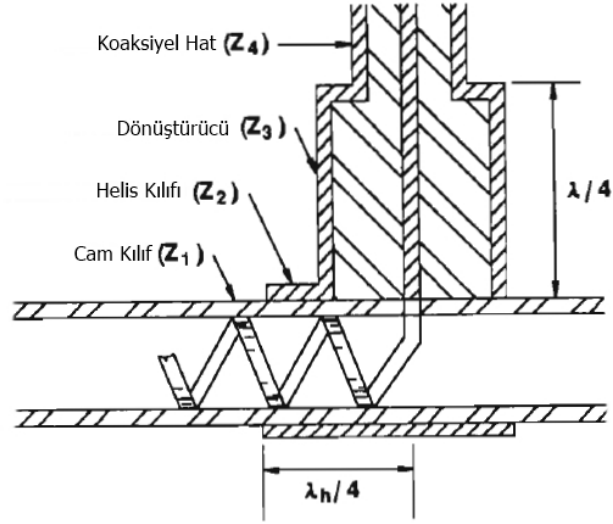
Şekil 2.50. Helis yapısından koaksiyel hatta geniş bir bant geçişinin yapılması (Gittins, 1965)



Şekil 2.51. Konik bir koaksiyel hat kullanılarak geçiş yapılması (Gittins, 1965)

Şekil 2.51'deki konfigürasyondaki bir problem, koaksiyel hattın merkez iletkeninin nispeten uzun fiziki destek kullanmayan bir bölüme sahip olmasıdır. Şiddetli şok ve titreşim koşullarında, helisin ucundaki kaynak bağlantısı zarar görebilir. Son turdan destek çubuklarına doğru ısı transferi nispeten zayıf olabilir, böylece son tur en azından kısmen koaksiyel hattın merkezi iletkeni tarafından soğutulmalıdır.

Yeterli soğutmayı sağlamak ve kaynağın bozulmasını önlemek için, mümkün olduğunca helisin yakınında bulunan merkez iletken için bir destek bulunmalıdır. Örneğin, bir TWT'nin çıkış penceresinde, merkez iletken için yalıtım desteği genellikle, helis ile bağlantı arasındaki dalga boyunun sadece bir kesridir. Bu desteğin malzemesi genellikle çok iyi bir termal iletken olan berilyum oksittir. Berilyum oksit, merkez iletkene ve dış iletkene lehimlenir ve vakum kılıfının bir parçası olarak işlev görür. Bu, merkez iletkenin (ısı genleşme ve büzülme nedeniyle) hareketlerinin helise iletilmesini önler.



Şekil 2.52. Helis yapısından koaksiyele geçiş aşamaları (Lichtenberg, 1962)

Şekil 2.52'de helis yapısından koaksiyel hatta geçiş yapılırken kullanılan empedans dönüşümleri gösterilmiştir.

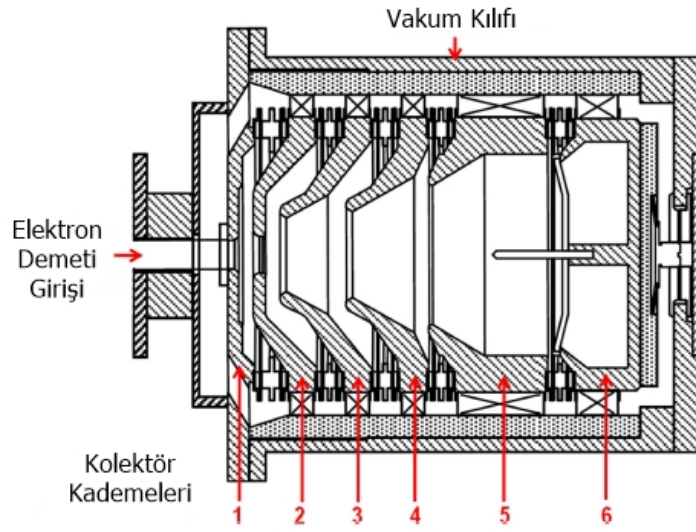


Şekil 2.53. TWT sistemlerinde kullanılan bağlantı yapıları (Nardamiteq, 2018)

TWT cihazlarındaki en önemli birleşenlerden birisi de kolektörler (toplayıcılar)'dir. Kolektörlerin temel görevi isminden de anlaşılacağı gibi elektron tabancasından gelen elektronları toplamaktır. Kolektöre gelen elektronlar kinetik enerjilerinin bir kısmını kaybetmişlerdir. Çünkü elektronlar RF devresi ile etkileşime girerken enerjilerinin bir kısmını RF devresine aktarırlar. Kolektörler aynı zamanda devrenin verimli çalışmasını da sağlarlar. Çünkü elektron tabancasından gelen elektronlar buraya çarpmadan yavaşlatılır. Böylece kapalı bir devre oluşturulmuş olur. Kolektörde toplanan akım yaklaşık olarak elektron tabancasının çalışma akımına eşittir.

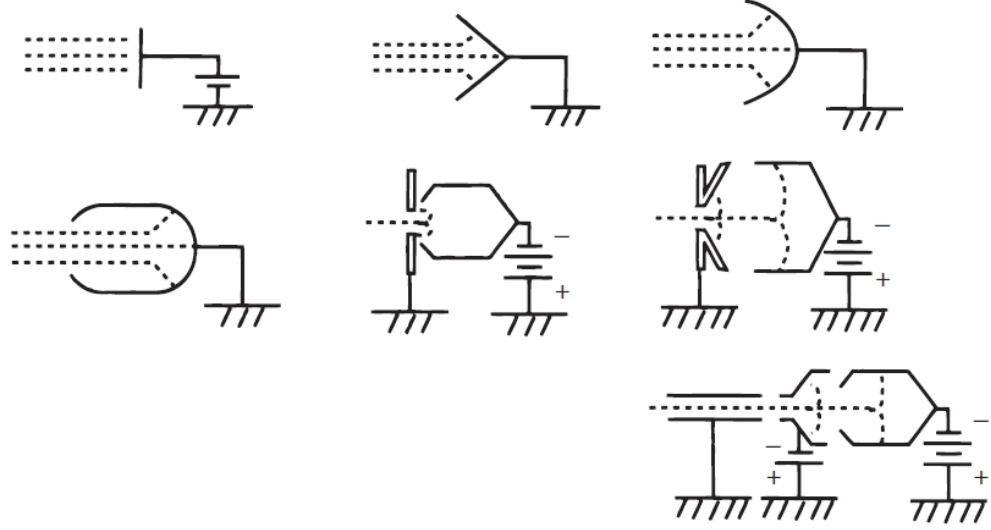


Kolektörler genellikle OFHC dediğimiz oksijensiz yüksek iletkenlikli bakırdan yapılmaktadır. Kolektörler yüzeyine yavaş da olsa elektronlar çarptığı için ısınmaktadır. Bu yüzden farklı tipte soğutma elemanları ile kullanılmaktadırlar. Kolektörlerin beslenme potansiyelleri elektron tabancasında bulunan katoda göre pozitif olmak zorundadır. Çünkü elektronların kolektör yüzeyine ulaşması için bu koşul gereklidir. Genellikle kolektör polaritesi pozitif veya toprak olmaktadır. Günümüzde kullanılan TWT cihazlarındaki kolektör mekanizması çok kademeli bir yapıya sahiptir. Çok kademeli kolektörlerin temel avantajı hızlı elektronlar ile yavaş elektronları birbirinden ayırmaktır.



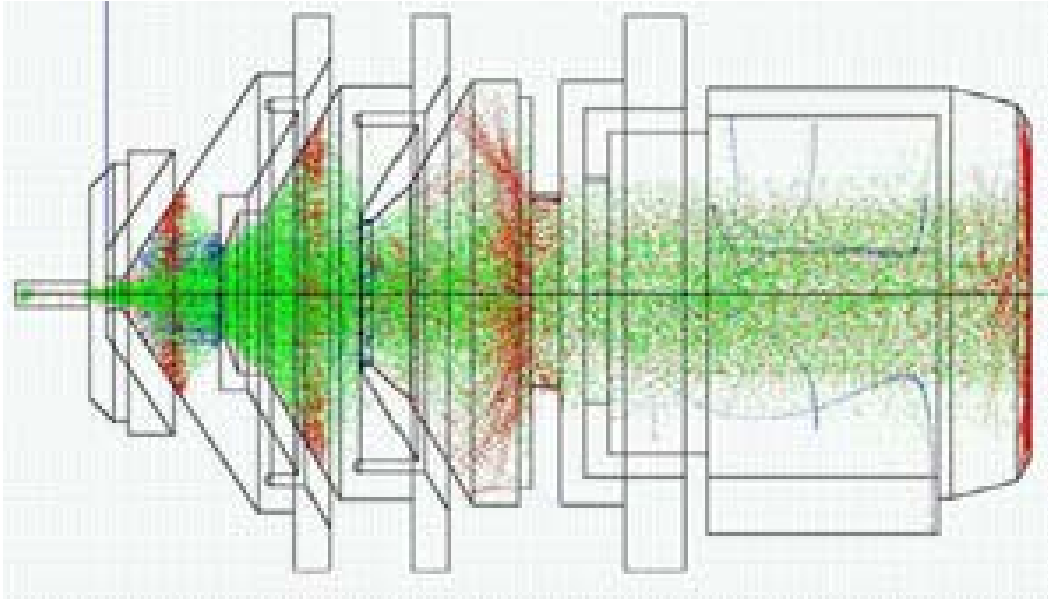
Şekil 2.54. 6 kademeli bir kolektörün şeması (Gilmour, 2011)

Şekil 2.54'de çok kademeli bir TWT kolektörünün birleşenleri gösterilmiştir. Tek kademeli kolektörlerde iç dizaynın geometrileri farklılıklar göstermektedir. Şekil 2.55'de TWT cihazlarında kullanılan kolektörlerin elektriksel bağlantı konfigürasyonlarının kesit görünümleri gösterilmiştir.



Şekil 2.55. TWT için çeşitli kolektör konfigürasyonlarının kesit görünümü (Whitaker, 1996)

TWT sistemlerinde genellikle gövde ve kolektör soğutulmaktadır. Bu soğutma işlemi yapılırken hava, su ve iletim gibi yöntemlerden birisi kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden hangisinin kullanılacağını TWT sisteminin kullanılacağı yer belirlemektedir.



Şekil 2.56. Thales şirketinin PIC programı kullanılarak 150W Ku-band TWT için simülasyonu yapılan bir elektrostatik 4 kademeli kolektörün birincil yansıyan ve ikincil elektronlarının dağılımı (Eichmeier ve Manfred, 2008)

Denklem 2.15'de TWT sistemindeki toplam elektron demeti akımı ile kolektör verimliliği arasındaki orantı gösterilmiştir.

Denklemdaki  $\eta_{tot}$  toplam TWT verimliliğini,  $\eta_{beam}$  elektron demetinin güç verimliliğini,  $P_{fund}$  TWT çıkışındaki RF gücünü,  $P_{RF}$  toplam RF gücünü,  $P_{beam}$  elektron demetinin gücünü,  $P_{losses}$  TWT'deki termal sebeplerden oluşan güç kayıplarını temsil etmektedir.

$$\eta_{tot} = \frac{P_{fund}}{P_{el}} = \frac{\eta_{beam} \cdot P_{beam}}{P_{RF} + P_{losses}} = \frac{\eta_{beam} \cdot P_{beam}}{P_{beam} - (P_{beam} - P_{RF} - P_{losses})} \quad (2.15)$$

Denklemler 2.16 ve 2.17 elektron demetinin gücünü belirtmektedir. Denklemlerdeki  $V_H$  elektronların hızlandırılma gerilimini,  $I_K$  katot akımını belirtmektedir. Denklem 2.17 sistemdeki toplam kayıpları göstermektedir. Bu denklemde  $P_{Coll}$  kolektör kayıplarını,  $P_H$  helis kayıplarını,  $P_A$  anot kayıplarını ve  $P_{filament}$  katot ısıtıcısındaki kayıpları temsil etmektedir.

$$P_{beam} = V_H \cdot I_K \quad (2.16)$$

$$P_{losses} = P_{Coll,losses} + P_{H,therm} + P_{A,therm} + (P_{filament}) \quad (2.17)$$

$$P_{recover} = (P_{beam} - P_{RF} - P_{losses}) \quad (2.18)$$

Denklemler 2.18'de bulunan  $P_{recover}$  terimi geri kazanılan toplam gücü temsil etmektedir. Kolektör verimi olan  $\eta_C$ 'nin geri kazanılan gücün sisteme giren elektron demeti gücüne oranı ile tanımlanmaktadır.

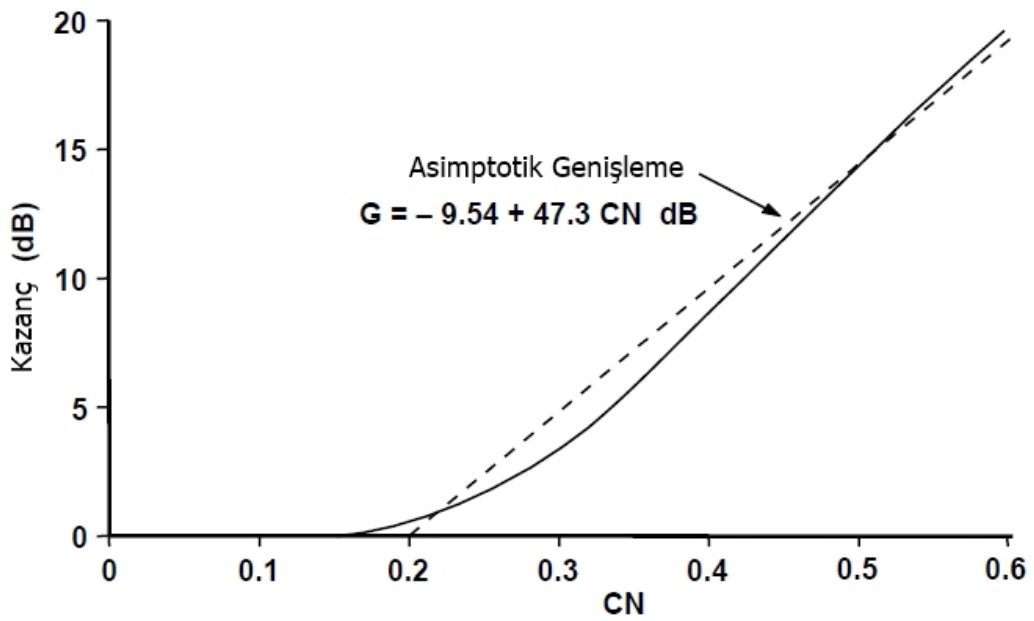
$$\eta_C = \frac{P_{recover}}{P_{enter}} = \frac{P_{beam} - P_{RF} - P_{losses}}{P_{beam} - P_{RF}} \quad (2.19)$$

$$\eta_{tot} = \frac{P_{fund}}{P_{el}} = \frac{\eta_{beam} \cdot P_{beam}}{P_{beam} - \eta_C(P_{beam} - P_{RF})} = \frac{\eta_{beam}}{1 - \eta_C(1 - \eta_{beam})} \quad (2.20)$$

Denklemler 2.20 TWT sistemindeki toplam verimliliği temsil etmektedir.

Kolektör mekanizması TWT sistemlerinin verimliliğini önemli ölçüde etkileyen bir birleşendir. Bu işlemleri yaparken kaybedilen güçlerin bir kısmını geri kazanmaktadır. Aynı zamanda devrenin kapalı kalmasını sağlamaktadır. TWT'lerde en önemli ölçülerden biriside kazanç değerleridir. Denklem 2.21 TWT'nin güç kazancı değerini dB olarak belirtmektedir. Denklemde bulunan CN ifadesi güç kazanç fonksiyonudur. N devre boyunca dalga boyu sayısıdır.

$$G = -9.54 + 47.3CN \quad (2.21)$$



Şekil 2.57. Eşzamanlı durumda sıfır kayıplı ve uzay şarjı olmayan bir TWT'de güç kazancı (Pierce, 1950)

Şekil 2.57'de başlangıç durumunda voltaj mesafe ile değişmez ve kazanç yoktur. Bunun nedeni, elektron demetinin RF akımına sahip olmaması ve elektronların demet haline gelene kadar devreye bir sinyal aktaramamasıdır. Kesikli çizgi -9.54 dB'den başlayan ve eğimi 47.3 olan artan dalgayı temsil etmektedir. Pierce, kazanım için denklem 2.22'deki gibi asimptotik bir ifade yazmıştır.

$$G = A + BCN \quad (2.22)$$

Burada, herhangi bir kayıp, uzay şarjı ve elektron demeti üzerinde ilk RF hızı veya akımı olmayan bir eşzaman durumunda,

$$A=10\log_{10}\left(\frac{1}{3}\right)^2 = -9.54 \text{ dB} \quad (2.23)$$

$$B=10\log_{10}(e^{\sqrt{3}\pi})^2 = 47.3 \quad (2.24)$$

Sonuç olarak CN>0.2 olması durumunda en iyi güç kazancı değeri alınacaktır. TWT'lerin dizayn edilmesi ve üretime geçirilmesi için öncelikle bilgisayar modellemesi kullanılmaktadır. Genellikle günümüzde çoğunlukla kullanılan program CST yazılımı olmaktadır. Bilgisayar ortamında gerekli koşullar tanımlanarak TWT bileşenlerinin davranışları tespit edilmektedir. Bu yöntemle kullanılacak malzemeler ve ölçüler belirlenmektedir. Üretim aşamasında temiz oda sistemleri kullanılmaktadır. Çünkü herhangi bir toz taneciği sistemin düzgün çalışmasını ve ömrünü olumsuz yönde etkileyebilmektedir. TWT sistemlerinin iç bölgesi daha öncede belirttiğimiz gibi vakum ortamına sahiptir. Çünkü iç ortamın basınç değerinin yüksek olması durumunda katot yüzeyi oksitlenip zehirlenebilmektedir. Ayrıca katot ısıtıcısı zarar görmektedir. Bunun yanında elektronlar ortamda bulunan parçacıklarla çarpışarak enerjilerini kaybetmelerine sebep olacaktırlar. TWT sistemlerinde iç kısmın vakum değeri  $10^{-9}$  Torr civarında bir değere sahiptir. Bu değerlere ulaşabilmek için yağlı mekanik pompa, turbo moleküler yüksek vakum pompası ve iyon pompası kullanılmaktadır. Vakum değerini ölçmek için geniş aralıklı sıcak ya da soğuk katotlu vakum ölçerler kullanılmaktadır. TWT sistemlerinde birleşenlerin birbirlerine eklenmesi için çeşitli özel kaynak yöntemleri kullanılmaktadır. Elektron tabancaları üretilirken spot kaynağı ve sert lehimleme (brazing) kaynağı kullanılmaktadır. Gövdelerin birleşiminde ise mikro lazer kaynağı kullanılmaktadır. Çünkü ısıya karşı hassas parçaların birleştirilmesi işleminde düşük ısı oluşturan kaynak yöntemleri tercih edilmektedir. Seramik ve metal parçaların birbirlerine birleştirilmesi işleminde sert lehimleme kaynağı yaygın olarak kullanılmaktadır. Tüm bağlantı işlemleri bitirildikten sonra sistemin iç kısmını vakuma almak için elektron tabancasının arka kısmı veya kolektörün arka kısmı kullanılmaktadır. Bu kısımlara bağlı olan bir bakır boru vakum ünitesine bağlanmaktadır.

Vakumlama işlemi yapılırken TWT sistemi düşük vakumlu bir fırının içerisinde ısıtılmaktadır. Bu yöntemle (bakeout) sistem içerisinde kalan gazların sökülmesi amaçlanmıştır. Böylece sistem temiz bir vakum ortamına sahip olmaktadır. Daha sonra gerekli vakum seviyelerine ulaşıldıktan sonra ultrasonik baskı kaynağı yöntemi ile vakum hattı kesilip kaynatılmaktadır. Bu yöntemle sistem içerisi kalıcı olarak vakumla hapsedilmiş olmaktadır. Şekil 2.58’de vakum elektroniği cihazlarında kullanılan donanımsal bileşenler ve kullandıkları malzemelerin türleri gösterilmiştir.

	Aluminum (O <sub>2</sub> )	Barium	Beryllium (O <sub>2</sub> )	Boron (Nitride)	Calcium	Carbon	Chromium	Copper	Gold	Iridium	Iron	Manganese	Molybdenum	Nickel	Osmium	Palladium	Platinum	Rhenium	Rhodium	Scandium	Silver	Strontium	Thorium	Titanium	Tungsten	Vanadium	Zirconium
Heater	■																										
Cathode	■	■	■	■						■			■	■					■			■	■			■	
Grids						■		■	■				■														■
Anode																											
Cavities																											
Helix													■				■										■
Support	■	■	■	■																							
Attenuator																											
Collector						■																					
Envelope								■	■			■		■													
Brazes								■	■				■			■	■		■	■							■
Polepieces																											■
Window	■	■																									
Getter		■																					■		■	■	

Şekil 2.58. Vakum elektroniği sistemlerinde kullanılan bileşenler ve kullandıkları malzemeler (Gilmour, 2011)

Şekil 2.59’da vakum elektroniği sistemlerinde düşük basınç ortamını oluşturmak için kullanılan çeşitli vakum pompaları gösterilmiştir. Genellikle çift kademeli yağlı vakum pompası, turbo moleküler pompa ve iyon pompası kullanılmaktadır. Üçlü pompa kombinasyonu sağlandığı zaman nihai basınç seviyesi 10<sup>-12</sup> torr seviyelerine kadar inebilmektedir.



Şekil 2.59. Mikrodalga vakum tüplerinde kullanılan vakum pompaları (IdealVac, 2018)

Kullanım Alanları	Frekans Bandları	Frekans Aralıkları (GHz)
Hava Radarları	C	5.4
Uçaksavar Silah Sistemi	MMW	94 ve 140
Astronomik Radarlar	P, L, S ve C	0.408, 0.43, 0.7, 1.295, 2.388 ve 8
Otomatik Ücret Toplama	P ve C	0.905 ve 5-6
Muharebe Gözetleme Radarı	MMW	70
Cep Telefonu	P	0.824-0.849 ve 0.869-0.895
Hücrel Video	Ka	28
Çarpışmadan Kaçınma Radarı	MMW	60, 77 ve 94
Doğrudan Yayın Uydusu	X	11.7-12.5
Küresel Dijital Uydu	C	4-8
GPS	L	1.575 ve 1.227
Yer Tabanlı Radar ve Navigasyon	X	8-12
GSM	P	0.890-0.915 ve 0.935-0.960
Enstrümantasyon Radarları	S ve C	2.9, 5.6 ve 1-4
Radyometrik Sensörler ile Füze Yönlendirme Sistemleri	MMW	35 ve 94
Çağrı Sistemleri	P	0.931-0.932
Kişisel İletişim Sistemleri	L ve S	1.85-1.99 ve 2.18-2.20
Radyo Altimetreler	C	4.2-4.4
Gemi Navigasyon Sistemleri	X	9.345-9.405
Özel Telekom Hizmetleri	Ka	27-40
Gözetleme ve Yakalama Radarları	MMW	94
Sentetik Diyafram Radarları	P	0.23-1
VAST Ağları	Ku	12-18
Geniş Alan Bilgisayar Ağları	MMW	60
Kablosuz Ağ	S	2-4
Kablosuz Ağlar	S ve C	2.4-2.48 ve 5.4

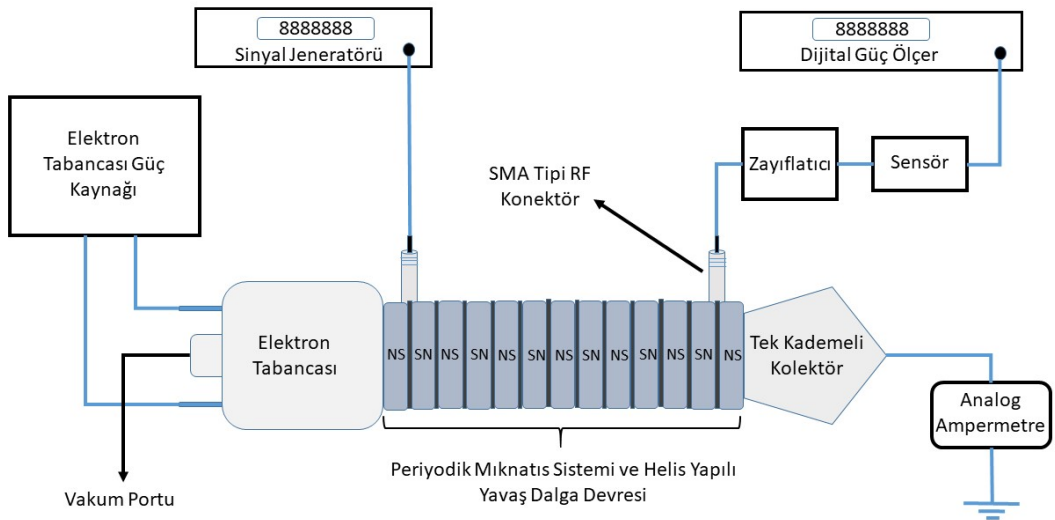
Şekil 2.60. Frekans bantlarına ve aralıklarına göre mikrodalgaların kullanım alanları (Khan, 2014)

Şekil 2.60'da frekans bantlarına ve aralık değerlerine göre mikrodalga sinyallerinin uygulandığı alanlar ve kullanıldığı cihazlar tanımlanmıştır. Buradan görüldüğü gibi mikrodalga sinyallerinin günlük hayatımızda çok geniş kullanım alanları bulunmaktadır.

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Materyal

Gerçekleştirilen çalışma Süleyman Demirel Üniversitesi'nde bulunan Plazma Araştırma Laboratuvarının imkânlarıyla ve Tübitak 1425 nolu projenin destekleriyle yapılmıştır. Bu doktora tezi çalışmasında CST yazılımı ile çok çekirdekli bilgisayar ortamında modellenen C bandındaki TWT sisteminin prototip halinin üretilmesi sağlanmıştır. C bandı 4-8 GHz frekans aralığını kapsamaktadır. Deney düzeneğinin kurulmuş şematik hali Şekil 3.1'de verildi. Öncelikle TWT sisteminin temel bileşenlerinden birisi olan yavaş dalga yapısı dediğimiz devrenin simülasyon değerlerinin verdiği ölçüler kullanılarak yavaş dalga devresi oluşturulmuştur. Malzeme olarak 0,25 mm çapında yüksek saflıkta molibden tel kullanıldı. Bobin sarma makinası yardımı ile paslanmaz çelik (SS304) kılavuz üzerine belirlenen devre uzunluğunda ve periyot aralığında helis yapısı sarıldı. Şekil 3.1'de kurulmuş olan deney düzeneğinin şematik gösterimi verilmiştir.

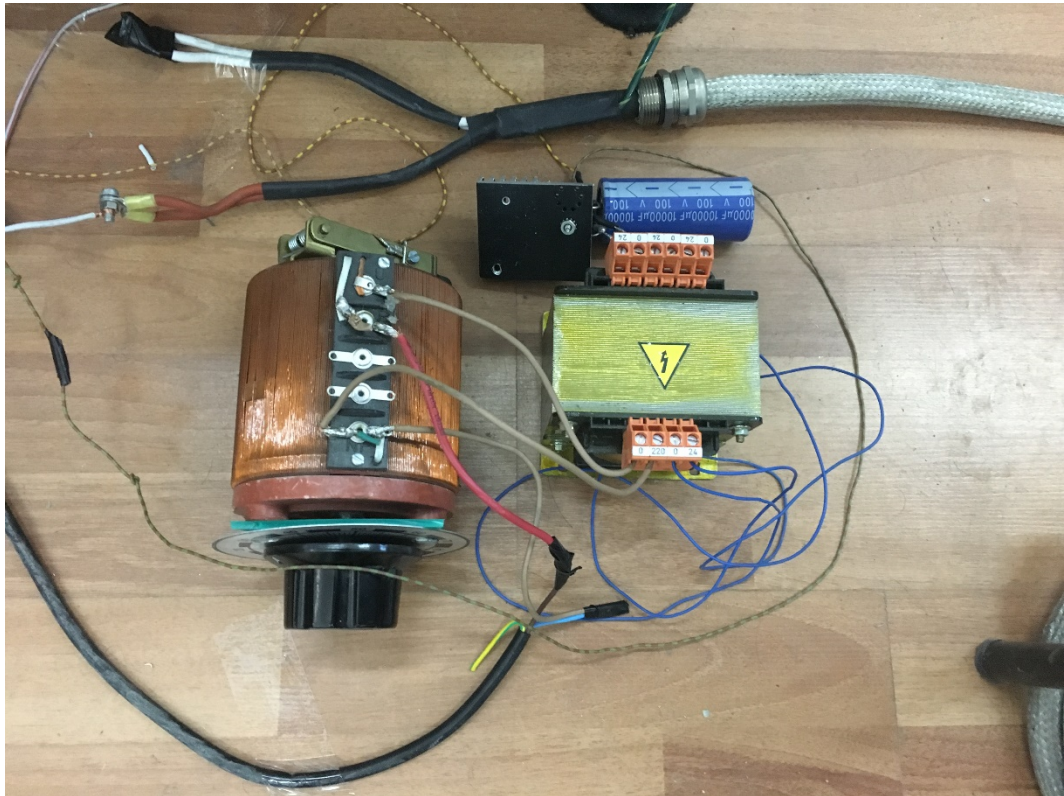


Şekil 3.1. TWT sisteminin deney düzeneğinin şematik gösterimi

Elektron kaynağı olarak -3.6kV hızlandırma potansiyelinde maksimum 48mA akım verebilen baryum oksit (BaO) tipi yayıcı (dispenser) katotlu elektron tabancası kullanıldı. Elektron tabancasının katot ısıtıcısını çalıştırmak ve elektronları hızlandırmak için laboratuvar ortamında Şekil 3.2'de gösterilen



transformatör yapılı, voltaj kontrollü DC güç kaynağı tasarlandı. Katot ısıtıcısını aktif etmek için filaman sistemine 5V 3A DC gerilim uygulandı. DC gerilim uygulanmasının sebebi katot yüzeyinde osilasyon oluşmasını engellemektir. Çünkü oluşan osilasyonlar elektron demeti kümelenmesini olumsuz olarak etkilemektedir. Ayrıca katot yüzeyine hızlandırma potansiyeli uygulanırken filamanın katot ile kısa devre yaptığı iletim bacağı tercih edildi. Çünkü aksi bir durumda filaman yüzeyinden emisyonların oluşmasına sebep olunacaktır. Bu durum filaman ömrünün kışalmasına neden olacaktır. Deney düzeneğinde elektron tabancasını uygun hızlandırma voltajında çalıştırmak için bilgisayar ortamında CST yazılımı kullanılarak simülasyonlar yapıldı. Sonuç olarak elektron tabancasına -3kV hızlandırma potansiyeli uygulandı ve 30 mA emisyon akımı elde edildi. Bu değer aynı zamanda elektron demetinin akımını temsil etmektedir.



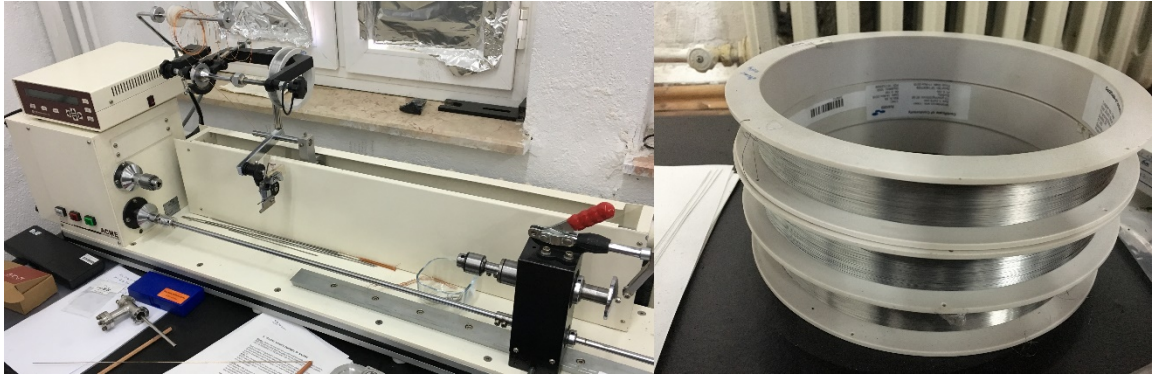
Şekil 3.2. Katot yüzeyini ısıtmak için kullanılan transformatör yapılı voltaj kontrollü DC güç kaynağı

Elektron demeti hızlandırma potansiyelini sağlamak için Şekil 3.3'de gösterilen yüksek voltaj DC güç kaynağı kullanıldı. Güç kaynağının filtrelili bir çıkış sağlaması için devre düzeneğine yüksek voltaj ile uyumlu DC kapasitör eklendi.



Şekil 3.3. Elektron demetini hızlandırmak için kullanılan Edwards 400/800 model yüksek voltaj DC güç kaynağı

Helis yapısını oluşturmak için kullanılan bobin sarma makinesi ve molibden tel makarası Şekil 3.4'de gösterilmiştir.

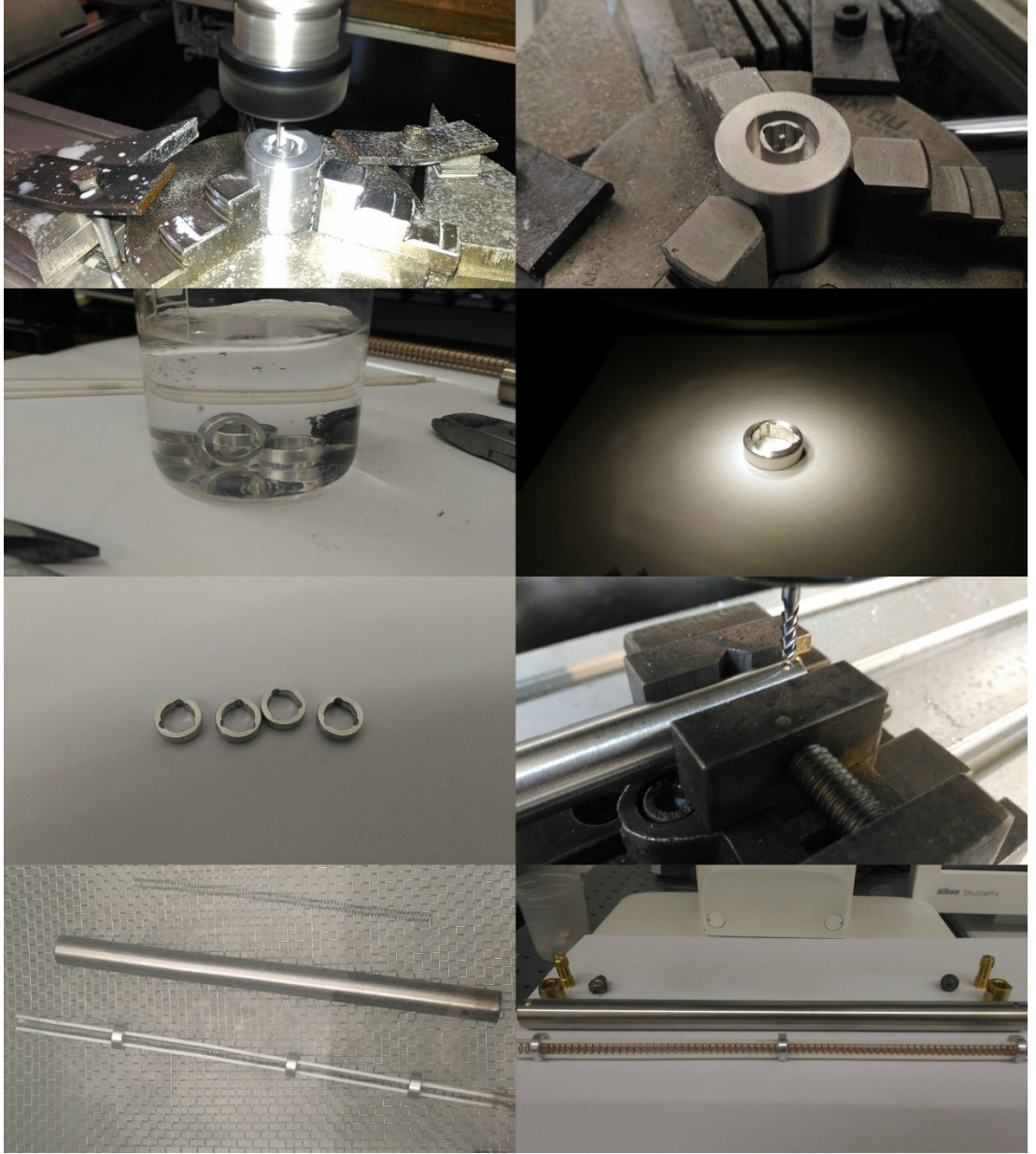


Şekil 3.4. ACME AE-X model helis sarma makinesi ve molibden tel makarası

Şekil 3.5'de seramik destek çubuklarının metal vakum kılıfı içerisinde hizalanmasını sağlayan alüminyum halkaların üretilme aşamaları gösterilmiştir. Üretim yapılırken 24000 rpm devirlerine çıkabilen CNC kontrollü spindle sistemi kullanıldı.



Üretilen halkalar, seramik destek çubukları ve helis sarmalı ultrasonik banyo yardımı ile temizlendikten sonra montaj işlemleri gerçekleştirildi.

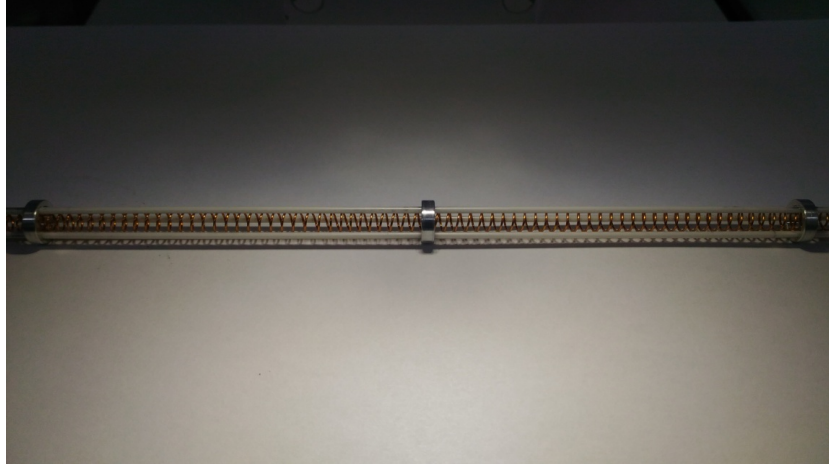


Şekil 3.5. Seramik destek çubuklarının bir arada kalmasını sağlamak ve vakum kılıfına yerleştirilmesini sağlamak için kullanılan destek halkalarının üretim aşamaları

Vakum kılıfı olarak SS304 malzemeden üretilmiş dikişli 1mm kalınlığında, 12 mm dış çapında ve 20 cm uzunluğunda boru kullanıldı.

RF giriş ve çıkışının yapılabilmesi için pirinç malzemeden SMA konektör yapıldı. Konektörün dielektrik kısmı teflon (PTFE) malzeme kullanılarak oluşturuldu. Oluşturulan SMA tipi RF konektörünün metal vakum kılıfına montajı vida

sistemi ile gerçekleştirildi. Şekil 3.6'da helis yapısı ile seramik destek çubuklarının ve destek yüzüklerinin montajlanmış hali gösterilmektedir. Bu düzenek aynı zamanda TWT sisteminin temel bileşeni olan yavaş dalga yapıları RF devresidir.



Şekil 3.6. TWT sisteminin yavaş dalga devresinde kullanılan helis yapısı ve seramik (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) destek çubukları

Periyodik mıknatıs sistemini oluşturmak için ALNICO yapılı halka mıknatıslar kullanıldı. Mıknatısların ölçüleri iç çap 13 mm, dış çap 30 mm ve kalınlık 10 mm olarak belirlendi. Eş kutuplu mıknatısları bir arada tutmak için demir halkalar kullanıldı. Mıknatısların SMA konektörlerin arasına kolay bir şekilde montajının yapılabilmesi için mıknatıslar RF konektörlerinin dış çapı kadar oyuldu. Bu yöntemle montaj işlemlerinin gerçekleştirilmesi sağlandı.



Şekil 3.7. Alnico halka mıknatıslar kullanılarak periyodik mıknatıs sisteminin oluşturulması ve SMA konektör yuvalarının açılması



Şekil 3.8. TWT sisteminde kullanılan elektron tabancası

Elektron tabancası vakum ortamına CF40 portu yardımı ile bağlandı. Periyodik mıknatıs sistemini elektron tabancası ve kolektör ile doğrusal bir şekilde tutturup hizalamak için içi dolu cam çubuklar ve alüminyum halkalar kullanıldı. Vakum haznesi olarak payreks fanuslu çok portlu vakum tankı kullanıldı. Sistemin basıncını ultra yüksek vakum (UHV) seviyesine indirmek için çift kademeli yağlı mekanik pompa ve turbo moleküler yüksek vakum pompası kullanıldı. Sistem basıncını ölçmek için konvektron sensörü ve sıcak katot iyonizasyon sensörü kullanıldı. Deneye başlamadan önce sistem basıncı atmosfer basıncı olan 760 Torr'dan  $3.5 \times 10^{-8}$  Torr seviyesine kadar indirildi. Ultra yüksek vakum seviyelerine inmemizin amacı katot zehirlenmelerini önlemektir. Çünkü yüksek basınç seviyelerinde ortamda bulunan oksijen ( $O_2$ ), karbon monoksit (CO), karbon dioksit ( $CO_2$ ) ve su buharı ( $H_2O$ ) ısınan katot ile reaksiyona girip katodun zehirlenmesine yol açacaktır. Bu durum katodun emisyon performansını düşürecektir. Sistemde elektron demetinin başarılı bir şekilde odaklanıp helis yüzeyine çarpmadan kolektöre ulaştığını gözlemlemek için kolektör kısmına seri bir analog ampermetre toprak yoluyla bağlandı. Bu yöntemle kolektöre ulaşan elektron demeti akımının ölçülmesi sağlandı.



Ölçüm yapılırken RF devresine sinyal uygulanmadı. Elektron tabancasının güç kaynağı ekranında bulunana emisyon akımı göstergesinin değeri ile kolektör yüzeyine ulaşan elektron akımının değeri karşılaştırıldı. Çıkan sonuçlarının birbirleriyle uyduğu gözlemlendi. Bu sonuç elektron demetinin başarı ile odaklanıp helis yapısı içerisinde çarpmadan geçirildiğinin bir çıktısıdır. Şekil 3.9'da elektron tabancasının oluşturduğu elektron demetinin gözlemlenmesi için kullanılan fosfor ekranın uyarılması gösterilmiştir. Bu yöntem sayesinde elektron demetinin deseni ve iz büyüklüğü hakkında bilgi sahibi olundu. Elektron tabancasının akımını ölçmek için ise Şekil 3.10'da gösterilen farklı skalalardaki analog DC ampermetreler kullanıldı.



Şekil 3.9. Fosfor ekran kullanılarak elektron demetinin gözlemlenmesi



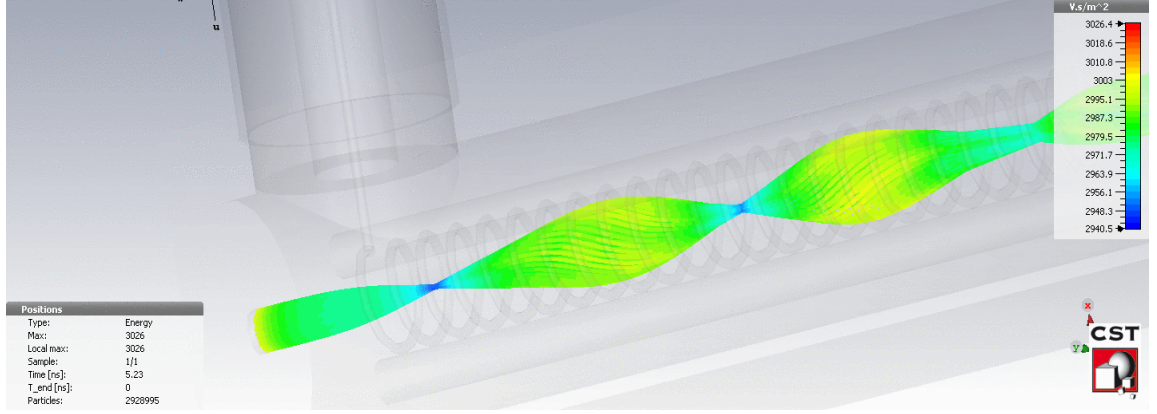
Şekil 3.10. Elektron demetinin akımını ölçmek için kullanılan analog DC ampermetreler



Şekil 3.11. TWT sisteminin atmosfer koşullarını sağlamak için kullanılan vakum haznesi ve TWT sisteminin montajının yapılması

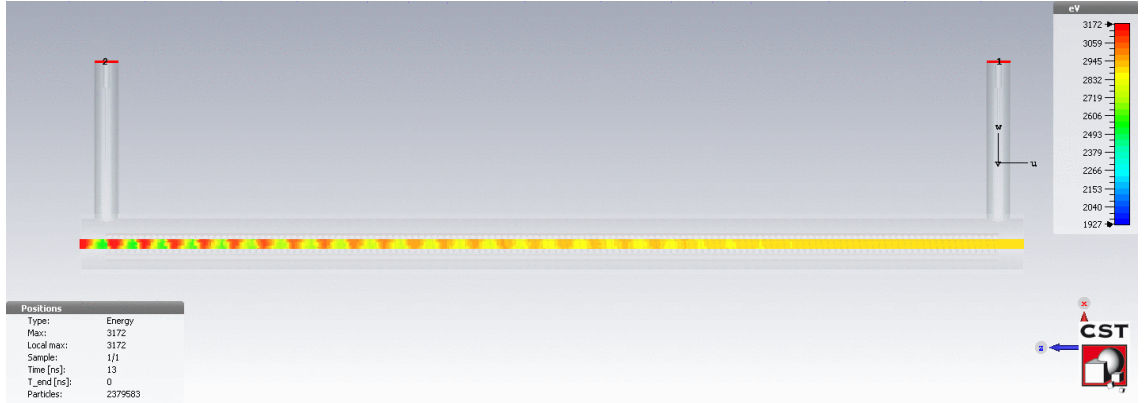


Şekil 3.12. Sistemin basınç değerinin ölçülmesi için kullanılan sıcak katot vakum sensörü ve Varian marka yüksek vakum sensörü monitörü



Şekil 3.13. CST yazılımı kullanılarak elektron demetinin manyetik alan ortamında odaklanma simülasyonunun gösterilmesi

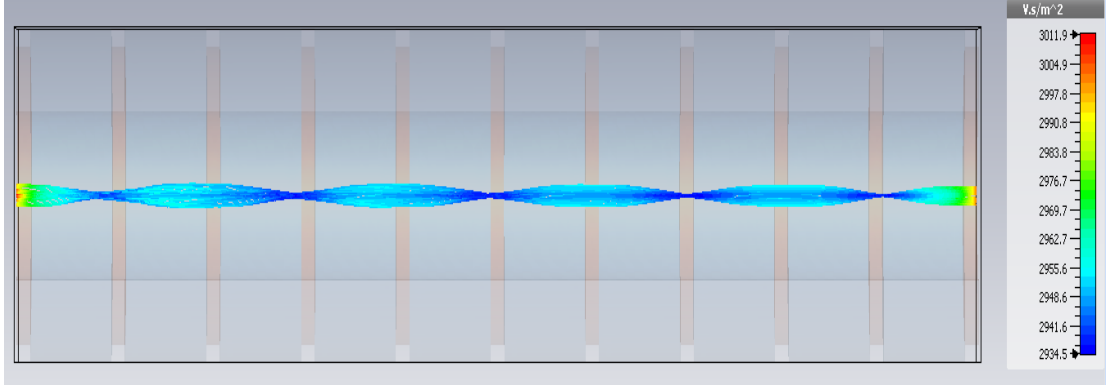
Şekil 3.13'te -3kV hızlandırma potansiyeline sahip elektron demetinin kalıcı mıknatıslar yardımı ile bilgisayar ortamında CST yazılımı kullanılarak modellenmesinin yapılması gösterilmiştir. Gerçekleştirilen simülasyonda elektron demetinin akımı 30 mA'dir. Simülasyon sonuçlarının hızlı alınabilmesi için grafik hızlandırıcı tekniği kullanıldı.



Şekil 3.14. TWT devresi boyunca elektron kümelenmesinin oluşturulmasının simülasyonu

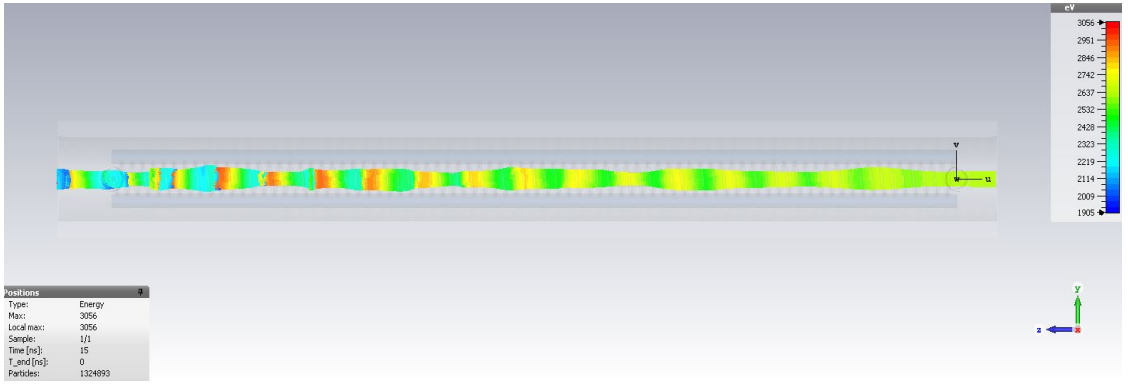
Şekil 3.14'te yavaş dalga devresi boyunca vakum tüpü içerisinde oluşan elektron kümelenmelerinin simülasyon ile gösterilmesi gerçekleştirilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi tüpün sonlarına doğru elektronların kinetik enerjilerinde azalma görülmektedir. Bunun sebebi elektronların kinetik enerjilerinin bir kısmını RF dalgasına aktarmasıdır. Bu neticede RF sinyalinde amplifikasyon gerçekleşmiştir.





Şekil 3.15. TWT devresinin tamamı boyunca kalıcı mıknatıslar ile elektron demetinin odaklanması

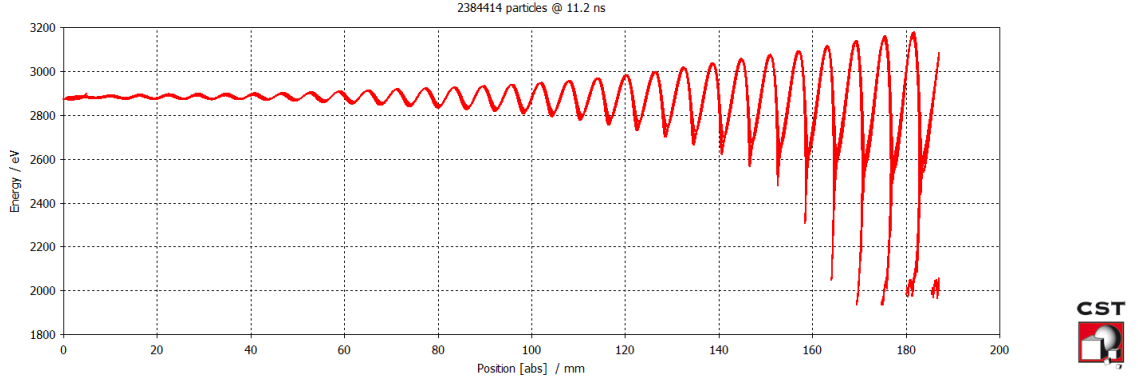
Şekil 3.15’de TWT devresinde RF sinyali yok iken elektron demetinin kalıcı mıknatıslar ile odaklanmasının simülasyonu verilmiştir.



Şekil 3.16. TWT devresinde RF sinyali var iken kalıcı mıknatıslar ile elektron demetinin odaklamasının yapılması

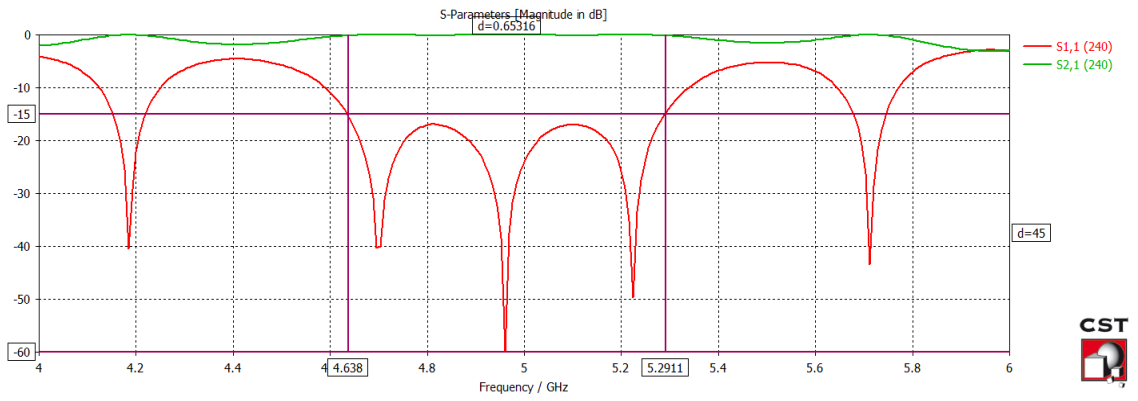
Şekil 3.16’da TWT devresinin tamamı boyunca sistemde RF sinyali mevcut iken kalıcı mıknatıslar ile elektron demetinin odaklamasının yapılması gösterilmiştir. Şekilde gösterildiği gibi RF sinyalinin elektron demeti üzerindeki etkisi ile elektron demetinin geometrisinde değişimler oluşmuştur. Sinyal amplifikasyonunun gerçekleşmesi için bu etkileşim gereklidir. Etkileşim sırasında elektronlar RF sinyalini uyarmaktadır. Elektronların enerjisinin RF sinyalinden büyük olmasından dolayı RF sinyali elektronları modüle eder ve bunun neticesinde elektron kümelenmeleri oluşur.

Elektronlar RF sinyaline enerjilerinin bir kısmını aktarırlar. Enerjileri azalan elektronlar devrenin tamamlanması için kolektöre çarparlar.



Şekil 3.17. Yavaş dalga devresi boyunca elektron demetinin kinetik enerjisinin devrenin konumuna göre değişimi

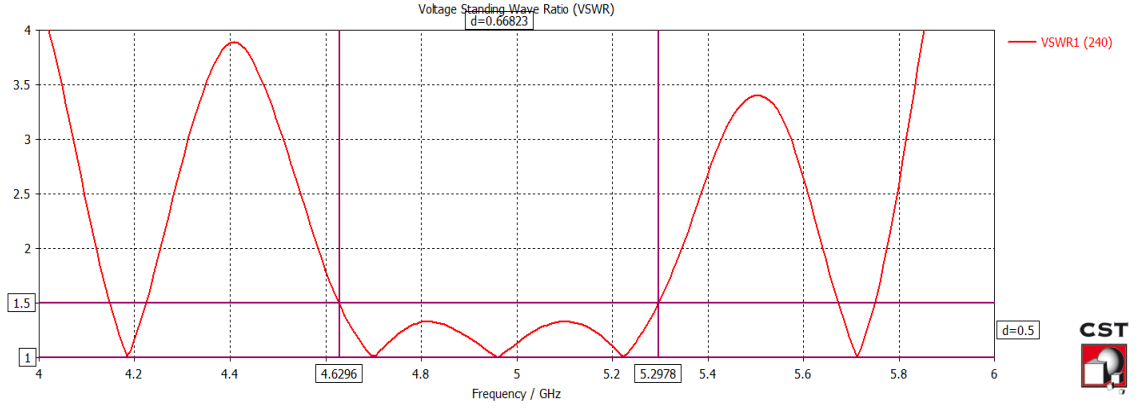
Şekil 3.17’de yavaş dalga devresi içerisinde hareket eden elektron demetinin kinetik enerjisinin belirli bir zaman aralığında konuma göre değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3.18. Frekans değerlerine göre S parametrelerinin gösterilmesi

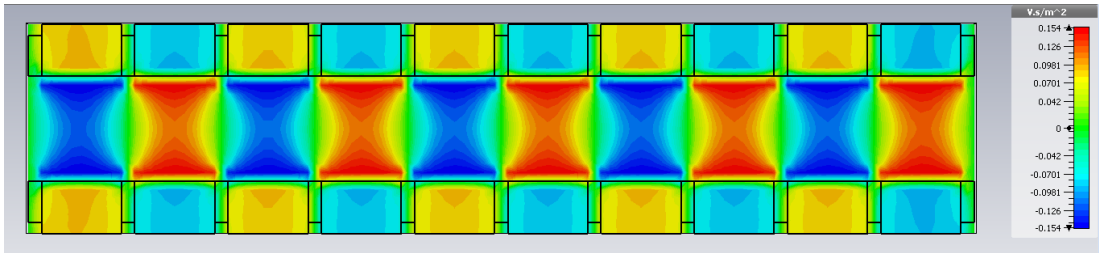
Şekil 3.18’de belirli frekans değerlerine göre S parametrelerinin taranmasının simülasyonu yapılmıştır. Çalışma frekansı olarak 4.93GHz seçildiği için bu noktadaki S parametreleri dikkate alınmaktadır. Bu yöntemle belirlenmiş çalışma frekanslarında sinyal zayıflamaları ve sinyal iletiminin giriş portundan çıkış portuna gerçekleşip gerçekleşmediği sonucuna varılmaktadır.

Buradaki  $S(1,1)$  giriş portundan çıkış portuna ilerlemedeki parametreleri,  $S(2,1)$  çıkış portundan giriş portuna olan ilerleme parametrelerini temsil etmektedir.



Şekil 3.19. Frekans değerlerine göre voltaj duran dalga oranının (VSWR) simülasyon yöntemi ile gösterilmesi

Şekil 3.19'da belirli frekans değerlerine göre VSWR değerinin simülasyon yöntemi ile gösterimi yapılmıştır. VSWR ifadesi voltaja karşılık duran dalga oranını temsil etmektedir. Bu değer 1 yakın olması yavaş dalga devresinde iletimin en verimli şekilde gerçekleşmesi anlamına gelmektedir.



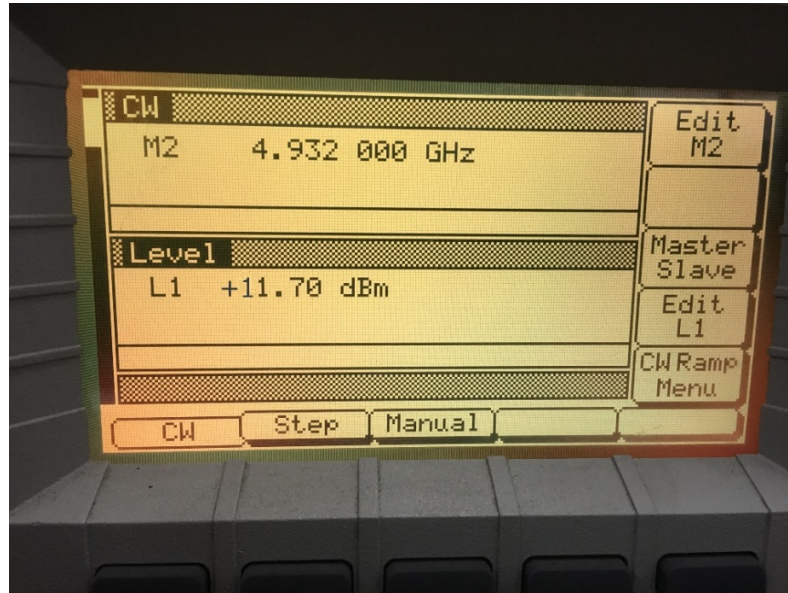
Şekil 3.20. Kalıcı periyodik mıknatıs sisteminin oluşturduğu manyetik alanın simülasyonunun yapılması

Şekil 3.20'de kalıcı mıknatısların periyodik olarak dizilmesi ile oluşan manyetik alan yapısının simülasyon yöntemi ile gösterimi yapılmıştır. Şekilde manyetik alan şiddetinin birleştirme çekirdeklerinde zayıfladığı, mıknatıs merkezlerinde güçlendiği görülmektedir.

### 3.2. Yöntem

Öncelikli olarak elektron tabancasının stabil çalışabilmesi için çift kademeli mekanik pompa ve turbo moleküler vakum pompaları kullanılarak gerekli vakum şartları sağlandı. Vakum değeri  $10^{-8}$  Torr seviyelerine ulaştıktan sonra elektron tabancası çalıştırıldı. Daha sonra gerekli elektron demeti akımının elde edilmesi için hızlandırma voltajı ve anot voltajı değerleri gerekli parametrelerde uygulandı. Sonra hızlandırma voltajı kapatılarak elektron demeti kesildi.

Sonraki aşamada RF devresinin elektron tabancasına yakın olan SMA giriş portuna sinyal jeneratörü yardımı ile C bandı olarak kabul edilen 4.93GHz frekansında ve 11.7 dBm gücünde sürekli modlu (CW) sinüs dalga formunda sinyal uygulandı. Şekil 3.21’de uygulanan RF sinyalinin sinyal jeneratöründeki ekran görüntüsü verilmiştir. RF devresinin çıkış portuna güç metrenin zarar görmesini engellemek ve çıkış gücünü ölçmek için zayıflatıcılar eklendi. Kablolardaki ve bağlantı konektörlerindeki kayıplar tespit edildi. Kablo ve bağlantı konektörlerinde yaklaşık olarak 17 dB’lik bir kayıp gözlemlendi. Zayıflatma elemanı olarak ise 60 dB seviyesinde zayıflatıcı bağlandı. Sinyal jeneratörü devrede iken güç metre çıkış portundan yaklaşık olarak -65 dBm’lik bir sinyal okudu. Böylece sistemde ne kadarlık bir sinyalin güçleneceğini tespit etmemiz sağlanmış oldu.



Şekil 3.21. RF devresine sinyal uygulamak için kullanılan Wiltron marka 68037B model sinyal jeneratörünün ekran görüntüsü

Şekil 3.22’de güç metrenin elektron demeti kapalı iken ve elektron demeti açık iken okunan RF gücü değerlerinin karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 3.22. RF çıkış portunun sinyal gücünü ölçmek için kullanılan Agilent marka E4418B model güç metre



Şekil 3.23. RF çıkışının ölçülmesinde kullanılan HP 8481D model güç sensörü ve zayıflatıcı

Şekil 3.23'de yüksek güçteki RF çıkışının ölçülmesinde kullanılan geniş aralıklı güç sensörü ve 60 dB'lik zayıflatıcı gösterilmiştir. Mikrodalga sistemlerinde güç ölçümü yapılırken genellikle dB ve dBm ifadeleri kullanılmaktadır (Goldberg, 1963).

#### 4. ARAŞTIRMA BULGULARI

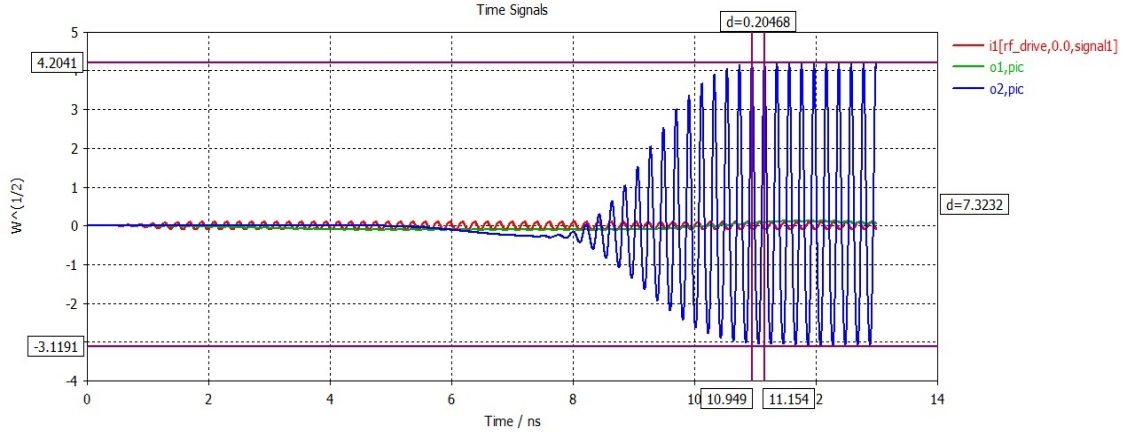
Güç metre ekranında devrede RF sinyali varken ve elektron demeti kapalı iken yaklaşık olarak -65 dBm gücü seviyesinde RF sinyali gözlemlendi. Sistemde RF sinyali var iken elektron demeti uygulandığında yaklaşık olarak -35 dBm'lik RF sinyali gözlemlendi. Aradaki fark alınıp sistemdeki konektör ve kablolardaki zayıflatma değerleri eklendiğinde zaman yaklaşık olarak 30 dBm'lik bir sinyal çıkışı alındığı tespit edildi. Bu değer watt cinsinden ifade edilecek olursa kıyaslama yaptığımız zaman TWT sistemine giren sinyal gücünün 15 mW değerinden 1 W değerine çıkarıldığını söyleyebiliriz. Sonuç olarak sinyal amplifikasyonu başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş oldu. Daha yüksek güç seviyelerine ulaşabilmek için TWT sisteminin çıkış portuna empedans uyumlama ünitelerinin yerleştirilmesi gerekmektedir. Çünkü yüksek frekanslarda çalışmalar yapıldığı için gücün geri yansımaları söz konusudur ve bu durum sinyal kayıplarına neden olmaktadır.

Çizelge 4.1. Laboratuvar ortamında kurulan TWT sisteminin deneysel parametreleri ve sonuçları

Hızlandırma Voltajı (kV)	-3
Elektron Demetinin Akımı (mA)	30
Yavaş Dalga Devresi Uzunluğu (cm)	18
Konektör Tipi	SMA
Helis Çapı (mm)	3,2
Helis Adımı Aralığı (mm)	1,3
Helis Telinin Kalınlığı (mm)	0,25
Helis Tur Sayısı	75
Destek Çubuklarının Kalınlığı (mm)	1,6
Manyetik Alan Kaynağı	AlNiCo
Giriş Sinyali Frekansı (GHz)	4,93
Giriş Sinyali Gücü (dBm)	11,7
Çıkış Sinyali Gücü (dBm)	30

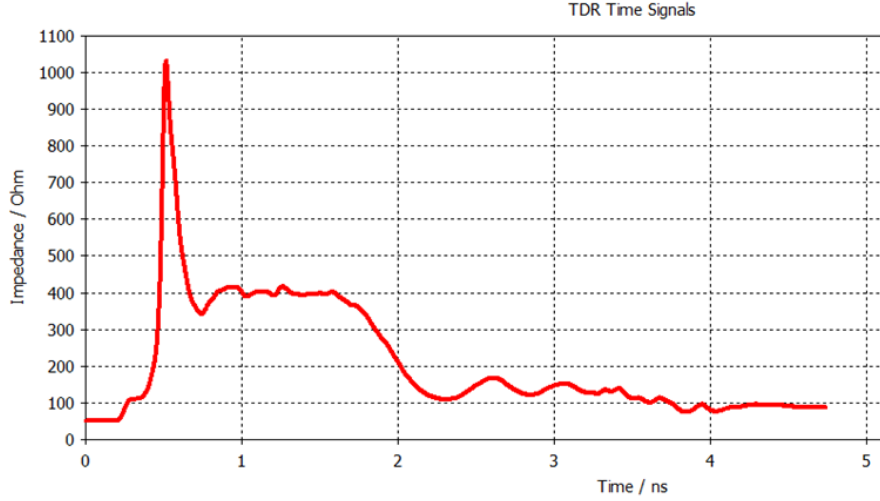
Çizelge 4.1'de laboratuvar ortamında kurulan TWT sisteminin deneysel parametreleri verilmiştir. Bu parametreler aynı zamanda CST yazılımında da kullanıldı. Bu yöntemle deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması yapıldı.





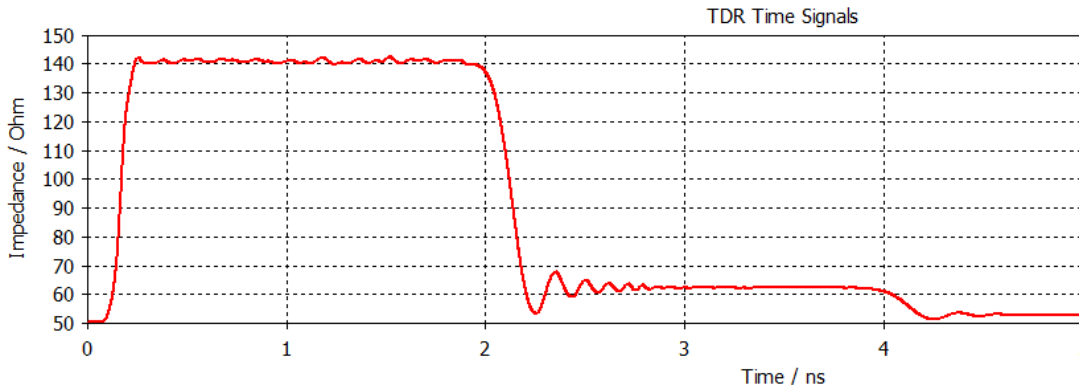
Şekil 4.1. CST yazılımı kullanılarak sinyal amplifikasyonunun gözlemlenmesi

Şekil 4.1’de bilgisayar ortamında girilen TWT parametreleri kullanılarak simülasyon gerçekleştirilmiştir. Deneysel parametreler ile simülasyon parametreleri aynı değerlerdedir. Sonuç olarak simülasyon deneyinde 10 mW olarak girilen sinyal 1 W olarak alındı. Deneysel sonuçta ise 15 mW olarak girilen sinyal 1 W olarak yükseldi. Bu farklılığın sebebi bağlantı elemanlarındaki kayıplar ve empedans uyumsuzluklarıdır. Çünkü TWT sisteminin güç çıkışı portunda empedans uyumlama ünitesi bulunmamaktadır. Bilgisayar ortamı her zaman mükemmel bağlantıların yapıldığını varsaymaktadır. Deney sırasında RF devresi daha yüksek güçlerde sürüldüğü zaman çıkış sinyalinin belirli bir zaman değişmediği fakat daha sonra düştüğü gözlemlendi. Bunun sebebi satürasyonun oluşmasıdır. Çünkü RF devresi belirli bir sinyal gücünün üstünde doyuma ulaşmaktadır. Kurmuş olduğumuz deney düzeneğinde yalıtkan destek çubuklarının merkezlerinde zayıflatıcı kaplama malzemesi kullanılmadı. Daha yüksek güç çıkışlarını elde edebilmek için zayıflatıcı kaplamasına ve daha yüksek elektron akımı verebilen elektron tabancaları kullanılmalıdır. Sistemde kolektörün önemi büyük rol oynamaktadır. Çünkü enerjilerinin bir kısmını RF dalgasına aktaran elektronlar kolektöre çarparak hareketleri sonlanmaktadır. Bu olay TWT devresinin kapalı bir döngü şeklinde devam etmesini sağlar. Bu durum aynı zamanda sistemin enerji verimliliği açısından da önemlidir. Deney sistemimizde tek kademeli kolektör kullanıldı. Kolektör beslemesi olarak toprak bağlantısı yapıldı. Modern kolektörlerde ise elektron demeti potansiyeline göre daha az negatif olan çok kademeli kolektörler kullanılmaktadır.



Şekil 4.2. CST yazılımı kullanılarak TDR analizinin yapılması

Şekil 4.2'de bilgisayar ortamında CST yazılımı kullanılarak tasarlanmış olduğumuz TWT sisteminin TDR (Time Domain Reflectometer) analizi yapılmıştır. Bu analiz ile iletim hattındaki empedans karakteristiğinin zamana bağlı olarak incelenmesi gerçekleştirilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi yük tepe noktası oluşmaktadır. Bu durum iletim hattında empedans uyumsuzluğuna neden olmaktadır. Bu dizaynda seramik destek çubuklarının bağlı olduğu yüzükler bulunmamaktadır. Sonraki bir TDR analizi işleminde seramik destek çubukları laboratuvar ortamında tasarlanmış olduğumuz alüminyum yüzükler kullanılmıştır. Bu analizde ise empedans karakteristiğini bozan tepe noktaları oluşmamaktadır. Bu sebeple iletim hattının empedans geçişi sorunsuz bir şekilde sağlanmaktadır. Şekil 4.3'de yüzüklü tasarım ile gerçekleştirilen TDR analizi gösterilmiştir.



Şekil 4.3. Yüzüklü tasarım ile gerçekleştirilen TDR analizi



## 5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Tamamlanmış olan tez çalışmasında hedeflemiş olduğumuz sinyal amplifikasyonu başarı bir şekilde gerçekleştirildi. Sonuç olarak düşük güçte TWT sistemine girmiş olunan RF sinyali çıkış portunda yüksek olarak elde edildi. TWT sisteminin giriş portuna uygulanan 15 mW ve 4,93 GHz değerindeki RF sinyali çıkış portunda 1 W olarak ölçüldü. C bandında çalışabilen ve yaklaşık olarak 30 dB kazanç verebilen bir TWT üretildi. Sistemdeki sinyal kayıpları kablo ve konektör bağlantılarında meydana gelmiştir. Bunun dışında çıkış portunda empedans uyumlama ünitesinin bulunmamasından dolayı oluşan yansımalar aldığımız sonuçları küçük ölçeklerde etkilemiştir. En önemli faktörlerden birisi imalat ve montaj yapılırken mikron ölçeği skalasında parça işleme büyük önem arz etmiştir. Bunun yanında deneysel sonuçlar ile simülasyon sonuçlarının uyuşmaları oldukça önemlidir. TWT cihazının en önemli bileşenlerinden birisi olan elektron tabancalarındaki katot yüzeyinin zehirlenmesi sonucu emisyon verimliliğinin düştüğünü gözlemledik. Ayrıca bu duruma sebep olan faktörlerin neler olduğunu ve nasıl elimine edilebileceğini öğrenmiş olduk. Çünkü TWT cihazlarındaki ömrünü belirleyen en önemli bileşen elektron tabancasıdır. Bunun yanında cihaz ömrünü belirleyen diğer bir faktör ise tüp içerisindeki vakum değeridir. Tüp ne kadar düşük vakum seviyesinde mühürlenmiş ise ömür o kadar uzun olmaktadır. Çünkü ortamda bulunan yabancı maddeler zamanla ısınan katot yüzeyi ile reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyon sonucu katot zehirlenmesi ortaya çıkacaktır. Laboratuvar ortamında tez çalışması kapsamında üretilen prototip TWT sistemi ülkemiz açısından geleceğe yönelik önemli bir adım olmuştur. Çünkü ülkemizde savunma, uzay ve haberleşme alanında yaygın olarak kullanılan TWT sistemleri yurt dışında bulunan Avrupa ülkelerinden ithal edilmektedir. Bu tedarikler sağlanırken yüksek miktarlarda harcamalar yapılmaktadır. Ayrıca tedarik edilen bu sistemler ilerleyen yıllarda bakım-onarım zamanı geldiğinde servis olarak sorunlar yaşamaktadırlar. Bu durum duraksamalara neden olmaktadır. Bu çalışma ile stratejik bir öneme sahip olan bu parçanın üretilirliği kanıtlanmıştır. Bunun yanında TWT sistemlerinde RF sinyalinin nasıl

yükseltildiği ve hangi çalışma parametresinin sistem üzerinde nasıl etkileri olduğu hakkındaki bilgileri literatüre kazandırılmıştır.

Bunun yanında daha yüksek frekans değerlerinde yüksek güçlerde amplifikasyon gerçekleştirebilecek TWT cihazlarının tasarımlarını gerçekleştirecek tecrübeler ulaşıldı. Ayrıca mikrodalga vakum tüplerinin temiz oda şartlarında üretimlerinin yapılması kullanım ömrü ve verimlilik açısından önem teşkil etmektedir. Bunun yanında TWT sistemlerinin önemli bir bileşeni olan elektron tabancalarının zehirlenmesinin büyük sorunlara sebep olduğu tecrübe edinildi. İlerleyen zamanlarda ise elektron tabancalarının daha verimli ve daha hale getirilmesi için yeni tip tasarımlar kullanılmaya başlanacaktır. Mikrodalga vakum tüpleri önemlerini her zaman korumaya devam edeceklerdir. Çünkü katı hal cihazlarının güç ve frekans değerleri belirli limitler çerçevesinde artmaktadır. Ayrıca katı hal cihazları verim olarak vakum elektroniği cihazlarından daha düşüktür. Katı hal cihazlarını soğutabilmek için büyük boyutlarda soğutucu bloklar kullanılmaktadır. Yüksek boyutlar havacılık ve uzay çalışmalarında dezavantajlar oluşturmaktadır. Çünkü uzaya gönderilen 1 gr malzemenin maliyeti göz ardı edilemeyecek değerlerdedir. Bu yüzden mikrodalga vakum elektroniği cihazları sınıfında bulunan TWT cihazları verimlilik ve hafiflik açısından avantaj konumunu korumaktadır. Geleceğe dönük çalışmalar TWT cihazlarının daha uzun ömürlü ve geniş bantlara ulaşabilmesi yönünde ilerlemektedir. Geniş bant aralıklarına sahip TWT cihazlarında kullanım alanlarının sayısı artmaktadır. Ayrıca gelişen teknolojiye elektron tabancalarının hızlı tepki vermesi sebebi ile radarlara yakalanmayan sistemlerin önemi artış göstermektedir. Tez çalışmasında belirttiğimiz gibi C bandında çalışabilen TWT cihazının prototipi üretildi. C bandı özellikle patriot hava savunma sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Savunma sistemlerinde özellikle TWT cihazları büyük önem arz etmektedir. Çünkü TWT cihazlarının farklı frekans ve güçlerdeki türlerinde elektronik karşı atak, hedef yanılma gibi alanlarda çalışmalar yapılmaktadır. Mikrodalga teknolojisi ile haberleşme ve kontrol sistemlerinin uygulamalarının yanında tıbbi amaçlı kullanım alanları da bulunmaktadır. Gelişen teknolojiye katı hal cihazları önemlerini ne kadar arttırıyorsa vakum elektroniği cihazları da önemlerini aynı oranda arttırmaya devam edecektir.

Sonuç olarak vakum elektroniği cihazları sınıfında önemli bir konuma sahip olan TWT' ler gün geçtikçe verimlilik, enerji tüketimi, kullanım ömrü ve hafiflik açısından gelişmeye ve kullanıcı sayısında artışa devam edecektir.

## KAYNAKLAR

- Alan R.J., 1978. Technical Digest. IEEE.
- Antonsen, T.M., Safier, P., Chernin, D.P, Levush, B., 2002. Stability of Travelling Wave Amplifiers with Reflection, IEEE Trans. Plasma Sci. (USA), 30, 1089.
- Alphamag, Erişim Tarihi: 25.12.2018.  
<https://www.alphamag.com/communications-radar-lab-magnets/>
- Altairusa, Erişim Tarihi: 20.10.2018. <http://www.altairusa.com/electronguns/>
- Basu, B.N., 1996. Electromagnetic Theory and Applications in Beam-wave Electronics. Singapore: World Scientific.
- Bodmer, M.G., Laico, J.P., Olsen, E.G., Ross, A.T., 1963. The Satellite Traveling-Wave Tube. The Bell System Technical Journal, Volume: 42 , Issue: 4, 1703 – 1748.
- Bunch, K.J., 2013. Approaches for modeling electron beam/electromagnetic interaction and their connection to distributed feedback lasers and other devices. Journal of Nanophotonics, 078597-1 Vol. 7.
- Brillouin, L., 1945. A Theorem of Larmor and Its Importance for Electrons in Magnetic Fields. Physics Rev., Vol. 67, 260-266.
- Brillouin, L., 1953. Wave Propagation in Periodic Structures. Dover, New York.
- Calame, J.P., Lawson, W.G., 1991. A Modified Method for Producing Carbon Loaded Vacuum-Compatible Microwave Absorbers from a Porous Ceramic. IEEE Transactions on Electron devices, Vol. 38, No. 6, 1538-1543.
- Ding, T., 1965. A boundary value problem for the periodic Brillouin focusing system. Acta Sci. Nat. Univ. Pekinensis 11(1), 31–38.
- Eastman, A., 1941. Fundamentals of Vacuum Tubes. New York: McGraw-Hill Publishing.
- Edgecombe C.F., 1993. Gyrotron Oscillators – Their Principles and Practice. London: Taylor and Francis.
- Eichmeier, J.A., Manfred, K.T., 2008. Vacuum Electronics Components and Devices. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-540-71928-1.
- Espe, W., 1966. Materials of High Vacuum Technology. Vol. 1, Pergamon Press, 623-660.

Electronenergy, Erişim Tarihi: 20.12.2018.  
<http://www.electronenergy.com/alnico-magnets/>

Feicht, J., Martin, R., Russell, H.W., Brian, C., 2007. TWT Coatings Improvement Investigation. L3 Communications-Electron Technologies.

Gewartowski, J.W., Watson, H.A., 1965. Principles of Electron Tubes. D. Van Nostrand Company, Inc., Chapter 3.

Gilmour, A.S.Jr., 1986. Microwave Tubes. Norwood: Artech House.

Gilmour, A.S.Jr., Gillette, M.R., Jenn Tsung, C., 1979. Theoretical and experimental TWT helix loss determination. IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-26, No. 10, 1581–1588.

Gittins, J.F., 1965. Power Travelling-Wave Tubes. The English Universities Press Ltd, Chapter 4.

Goldberg, M., 1963. Microwave. Centrex Publishing Company, Eindhoven.

Green, M.C., 1981. Dispenser cathode physics. Final Technical Report, RADC TR 81 211.

Harper, R., Puri, M.P., 1986. Heat transfer and power capabilities of EHF helix TWTs. Technical Digest, IEDM, 498–500.

Hiramatsu, Y., 1979. Study of block supported helix circuits for high-power TWTs. Technical Digest, IEDM, 416–417.

Hutter, R.G.E., 1960. Beam and Wave Electronics in Microwave Tubes. Princeton: D Van Nostrand.

Iverson, A.H., 1956. Precision Helix Winding and a Mechanism of Loss Variation. IRE Transactions on Electron devices, Vol. ED-3, 205-206.

Idealvac, Erişim Tarihi: 14.11.2018. <https://www.idealvac.com>

Jain, P.K., Basu, B.N., 1988. A Theory of the Attenuator-Coated Helical Slow-Wave Structure of a Traveling-Wave Tube. IEEE Transactions on Electron devices, Vol. 35, No. 10, 1750-1757.

Jacquez, A.E., Scott, A., 1981. Final Report. AFWAL-TR-81-1176.

Jones, H.A., Langmuir, I., 1927. The characteristics of tungsten filaments as functions of temperature. GE Rev., vol. 30, 354-361.

Kesari, V., Basu, B.N., 2017. Analysis of some periodic structures of microwave tubes: part 1: analysis of helical slow-wave structures of traveling-wave tubes. J. Electromagn. Waves Appl., 37, 1–37.

- Khan, A.S., 2014. Microwave Engineering Concepts and Fundamentals. Taylor & Francis Group, LLC.
- Kompfner, R., 1947. The traveling-wave tube as amplifier of microwaves. Proc. IRE, Vol. 35, No. 2, 124-127.
- Kompfner, R., 1963. The Invention of the Traveling Wave Tube. CA: San Francisco Press.
- Kumar, V., Vohra, A., Srivastava, V., 2007. Nickel and iron as attenuator materials for helix TWT. Indian Journal of Radio & Space Physics, 36(4), 345-347.
- Lichtenberg, A.J., 1962. Prebunched Beam Traveling-Wave Tube Studies. IRE Transactions on Electron Devices, 345-351.
- Lide, D.R., 2008. Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, FL.
- Lindenblad N.E., 1942. Electron discharge device system. U.S. Patent 2300052.
- Mendel, J.T., Quate, C.F., Yocom, W.H., 1954. Electron Beam Focusing with Periodic Permanent Magnet Fields. IRE Proc., Vol. 42, 800-810.
- Mulcahy, T., Song, H., Francisco, F., 2009. New Method of Integrating Periodic Permanent Magnet (PPM) Assembly In Traveling Wave Tubes (TWTs). Progress In Electromagnetics Research C., Vol. 10, 187-199.
- Nardamiteq, Erişim Tarihi: 15.11.2018.  
<https://nardamiteq.com/featuredproducts.php?ID=113>
- Pendel, Erişim Tarihi: 20.12.2018.  
<http://www.pendel.com/images/technology/heliuxcomparison.jpg>
- Pierce, J.R., 1954. Theory and Design of Electron Guns. 2nd ed., New York: Van Nostrand.
- Pierce, J.R., 1950. Traveling-wave tubes. Bell Syst. Tech. J., 29(1), 1-59.
- Pierce, J.R., 1950. Traveling-Wave Tubes. D. Van Nostrand Company, Inc., p. 140.
- Putz, J.L., Cascone, M.J., 1979. Effective use of dispersion shaping in broadband helix TWT circuits. IEDM, IEEE, 422-424.
- Raczinski, A.T., 1982. "TWT principles," TWT training course presented at NSWC, Crane, IN.
- Reimann, A.L., 1934. Thermionic Emission. Chapman & Hall, London.

- RF Wireless World, Erişim Tarihi: 10.11.2018. <http://www.rfwireless-world.com/Terminology/Advantages-and-Disadvantages-of-TWT-Traveling-Wave-Tube.html>
- Shulim, E.T., 2007. Electron Beams and Microwave Vacuum Electronics. A JOHN WILEY & SONS, INC., PUBLICATION.
- Song, H., Tekamp, L., Francisco, F., Lin, M.C., Stoltz, P.H., Smith, D., Choi, G.W., Choi, J.J., 2013. Integrated Design of a Compact and Lightweight S-Band Traveling-Wave Tube Amplifier for a New Class of Microwave Power Module. *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, 5, 96-102.
- Stokes, A.W., 1990. Magnetic Focusing of Electron Beams for Linear Beam Tubes. University of Natal, Department of Electronic Engineering, M.Sc. Thesis.
- Thomas, R.E., Gibson, J.W., Haas, G.A., Abrams, R.H., 1990. Thermionic sources for high-brightness electron beams. *IEEE Trans. Electron Devices*, Volume: 37 Issue: 3, 850-861.
- Ura, K., Terada, M., 1966. Equivalence of Periodic Magnetic Field to Uniform Magnetic Field in Electron Beam Focusing. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-13, No. 12, 930-934.
- Vassilopoulos, N., 1994. The Development of An Experimental, Low Profile, Broadband Travelling Wave Tube Amplifier. University of Natal, Department of Electronic Engineering, PhD Thesis, Durban.
- Vaughan, J.R.M., 1977. Electron Trajectories in the PPM-Focused Coupled-Cavity TWT. *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-24, No. 1, 67-68.
- Wathen, R.L., 1953. A history of the traveling wave tube. Report No. 5202-5020, Sperry Gyroscope Company.
- Whitaker, J.C. (Ed.), 1996. *The Electronics Handbook*. CRC Press, Boca Raton, FL, 428-443.
- Zhang, H., Weiwei, L., Shuxin, B., Ke, C., 2008. Periodic permanent magnet focusing system with high peak field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320, 1675-1679.

## ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ferhat BOZDUMAN  
Doğum Yeri ve Yılı : Malatya, 1987  
Medeni Hali : Bekar  
Yabancı Dili : İngilizce  
E-posta : ferhatbozduman@gmail.com



## Eğitim Durumu

Lise : Saime Salih Konca Anadolu Lisesi, 2001-2004  
Lisans : SDÜ, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, 2005-2009  
Yüksek Lisans : SDÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Bölümü, 2010-2012

## Mesleki Deneyim

PlazmaTek 2010-Halen

## Yayınları

B. Ureyen Kaya, A. D. Kececi, H. E. Guldaz, E. S. Çetin, T. Öztürk, L. Öksüz, F. Bozduman, 2013. Efficacy of endodontic applications of ozone and low temperature atmospheric pressure plasma on root canals infected with *Enterococcus faecalis*. *Letters in Applied Microbiology*, 58, 8-15.

Melek Kiristi, Ferhat Bozduman, Ali Gulec, Erdogan Teke, Lutfi Oksuz, Aysegul Uygun Oksuz, Hüseyin Deligöz, 2014. Complementary all Solid State Electrochromic Devices Using Carboxymethyl Cellulose Based Electrolytes. *Journal of Macromolecular Science, Part A: Pure and Applied Chemistry*, 51, 481-487.

Meliha Oktav Bulut, Cihan Devirenoğlu, Lutfi Oksuz, Ferhat Bozduman, Erdogan Teke, 2014. Combination of grey cotton fabric desizing and gassing treatments with a plasma aided process. *The Journal of The Textile Institute*, 105, No. 8, 828-841.



Melek Kiristi, Ali Gulec, Ferhat Bozduman, Lutfi Oksuz, Aysegul Uygun Oksuz, Ahmed Hala, 2014. Radio frequency-H<sub>2</sub>O plasma treatment on indium tin oxide films produced by electron beam and radio frequency magnetron sputtering methods. *Thin Solid Films*, 567, 32–37.

Filiz Kuralay, Selma Tunç, Ferhat Bozduman, Lütfi Öksüz, Ayşegül Uygun Öksüz, 2016. Biosensing applications of titanium dioxide coated graphene modified disposable electrodes. *Talanta*, 160, 325-331.

Esin Eren, Lütfi Öksüz, Ali İhsan Kömür, Ferhat Bozduman, Neslihan Nohut Maslakçı, Ayşegül Uygun Öksüz, 2015. Atmospheric pressure plasma treatment of wool fabric structures. *Journal of Electrostatics*, 77, 69-75.

Ali Güleç, Ferhat Bozduman, Ahmed Hala, 2015. Atmospheric Pressure 2.45-GHz Microwave Helium Plasma. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 43, 786-790.

Melek Kırıştı, Ferhat Bozduman, Ayşegül Uygun Öksüz, Ahmed Hala, Lütfi Öksüz, 2014. A Comparison Study of Microwave and Radio Frequency Plasma Polymerized PEDOT Thin Films. *Journal of Macromolecular Science*, 52, 124-129.

Melek Kırıştı, Ferhat Bozduman, Ayşegül Uygun Öksüz, Lütfi Öksüz, Ahmed Hala, 2014. Solid State Electrochromic Devices of Plasma Modified WO<sub>3</sub> Hybrids. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53, 15917-15922.

Sule Erten-Ela, Melek Kiristi, Ana Varlec, Ferhat Bozduman, Maja Remskar, Lutfi Oksuz & Aysegul Uygun Oksuz, 2017. Platinum-free counter electrodes of plasma- modified hybrid nanomaterials for dye-sensitised solar cells. *International Journal of Sustainable Energy*, 1-14.

### **Katıldığı kurs, seminer ve programlar**

1. XIII. NATIONAL CONGRESS OF SPECTROSCOPY 15-18 MAY 2013, BURDUR
2. 1st IMEPS Conference 23 – 25 April 2014 in Antalya, Belek
3. 39th IEEE International Conference on Plasma Science 8- 12 July 2012 in Scotland Edinburgh
4. KACST Plasma Hybrid System Installation 2014 Saudi Arabia Riyadh
5. The 42nd IEEE International Conference on Plasma Science 2015 Antalya, Belek

### **Özetler ve Posterler**

1. 2.45 GHz Atmospheric Pressure Waveguide Based Plasma Designs, ICOPS, Edinburgh 2012
2. Atmospheric Pressure Microwave Plasma Torch, ICOPS, Chicago 2011

3. Plasma Water Treatment by Electrical Discharge Methods, ICOPS, Chicago 2011
4. PTFE and C<sub>3</sub>F<sub>6</sub> Deposition on the AISI 1050 Stainless Steel for Lubrication by RF Plasma, ICOPS, Edinburgh 2012
5. Atmospheric Pressure Plasma Electron Density Measurements by Magneto hydrodynamic Generator (MHDG) Method, APS, USA 2012
6. Optical Measurements of Hybrid ECR and Helicon discharges, APS, USA 2013
7. Optical and double probe measurements of helicon argon plasma source in axially varying magnetic field intensity, APS, USA 2013
8. Effects of RF Plasma Polymerization Parameters on Polymeric Thin Film Characteristics, APS, USA 2013
9. Characteristics of atmospheric pressure microwave plasma torch, APS, USA 2012
10. Optical measurements of helicon, inductive and capacitive RF discharges effects in ECR plasma sources, APS, USA 2013
11. Comparison of DC and RF magnetron sputtering systems for Electrochromic W/Ti Thin Film Deposition, APS, USA 2013
12. Graphene synthesis by atmospheric pressure microwave plasma, ICOPS, Turkey 2015
13. Sensor properties of RF-titanium dioxide plasma modified graphene, ICOPS, Turkey 2015
14. Plasma polymerized electrospun PEDOT-S nanofibers obtained by in-situ radio frequency plasma treatment, ICOPS, Turkey 2015
15. Structural, thermal and morphological properties of plasma polymerized MnO<sub>2</sub>/PPy composite, ICOPS, Turkey 2015
16. Modification of carbon nanotube with poly (3, 4-ethylenedioxythiophene) by using RF rotating Plasma, ICOPS, Turkey 2015
17. Corrosion resistance of SiO<sub>2</sub> thin film coated biomedical Ti-13Nb-13Zr titanium alloy by E-Beam, ICOPS, Turkey 2015
18. A study on characterization of polymer-coated wool fabrics using plasma polymerization, ICOPS, Turkey 2015