

JOSEPHSON EKLEM SİSTEMİ VE GERİLİM STANDARDI

Beylan Akyel (1), Saliha Selçik (1), Hasan Dinçer (2)

(1) TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü

(2) Prof. Dr., Kocaeli Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Bugün yeryüzünde belli başlı metroloji enstitülerinde birinci seviye DC gerilim standardı olarak kullanılan Josephson eklem sistemi, 1962 yılında Brian Josephson tarafından ortaya atılan "AC Josephson etkisi" prensibine dayanmaktadır. Josephson etkisi, temel fiziksel sabitler aracılığıyla gerilimi frekansa bağlayan fiziksel bir etkidir. Josephson eklemi ise, birbirlerinden ince yalıtkan bir oksit tabakasıyla ayrılmış iki süperiletken malzemenin zayıfça biraraya getirilmesiyle oluşmaktadır. Bir Josephson eklemi, ideal bir frekans-gerilim dönüştürücüsüdür.

Tek bir Josephson eklemi üzerinden elde edilebilecek gerilim değeri en fazla mV'lar mertebesinde olabilmektedir. Daha yüksek gerilim değerleri elde etmek için çok sayıda Josephson ekleminin seri olarak bir araya getirilmesi gerekmektedir. Bugün, değerleri -15 ile 15 V arasında değişen oldukça kararlı Josephson gerilim standartları elde edilebilmekte ve primer metroloji laboratuvarlarında gerilim referansı olarak diğer DC standartların kalibrasyonunda kullanılmaktadır.

Bu bildiride Josephson eklem sistemi ve metrolojide kullanımı genel olarak anlatılmakta, ayrıca bu sistemin Ulusal Metroloji Enstitüsü Gerilim Laboratuvarı'nda kurulması çalışmaları hakkında bilgi verilmektedir.

Anahtar Kelimeler : DC Gerilim, Josephson, primer standart

1. GİRİŞ

SI (Système International d'Unites - Uluslararası Birimler Sistemi) tanımına göre gerilim birimi Volt, 1 Amper akım taşıyan iletken tel üzerindeki iki nokta arasında 1 Watt güç harcandığı durumda, bu iki nokta arasındaki potansiyel farkı olarak tanımlanır. Tanımına uygun olarak Volt, $V=P/I$ eşitliği ile akım birimi üzerinden gerçekleştirildiğinde, güç birimi Watt'ın temel birim olmayıp, uzunluk, kütle ve zaman birimleri cinsinden ifade edilmesi ve akım belirsizliğinin büyük olmasından dolayı oldukça yüksek bir belirsizlikle türetilmektedir.

Günümüzde ulusal metroloji laboratuvarlarında primer gerilim standardı olarak Josephson Eklem Sistemine dayanan gerilim standartları kullanılmaktadır. Josephson Eklem Sistemi gerilim birimini temel SI birimlerinden türetmese de, çok kararlı ve tekrarlanabilir gerilim referansı olması sebebiyle gerilim ölçümlerinde primer standart olarak kabul edilmiştir. Bu şekilde, elektriksel ve mekanik SI birimleri ile elde edildiğinde 10^{-6} mertebesinde olan gerilim belirsizliği, frekans doğruluğunu gerilime taşıyan Josephson Eklem Sistemi ile 10^{-9} mertebesine indirilmiştir.

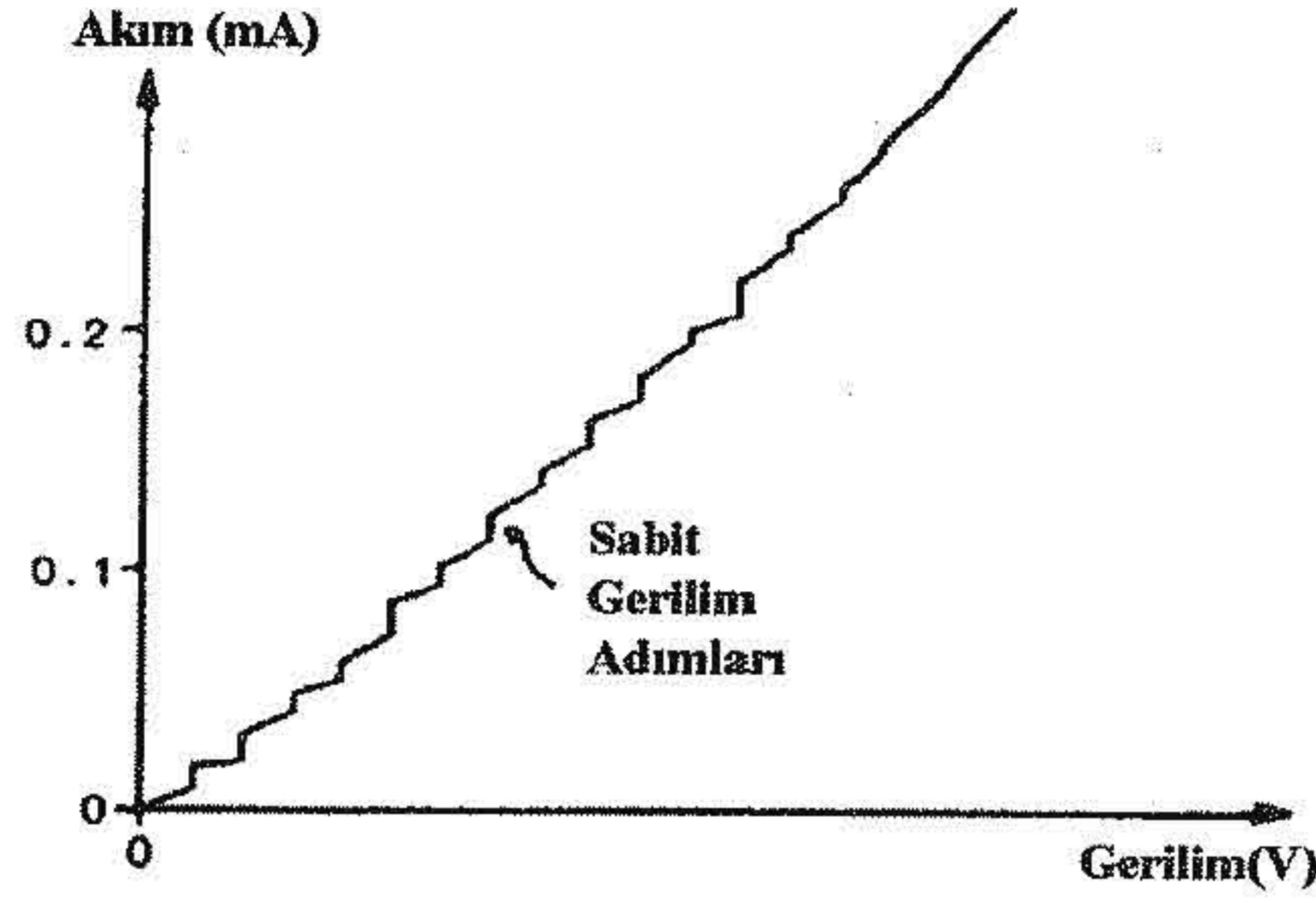
Bu bildiride, Josephson eklem sistemi ve gerilim standardı hakkında genel bilgi verilmekte ve sistemin Ulusal Metroloji Enstitüsü'nde kurulması çalışmaları anlatılmaktadır.

2. JOSEPHSON ETKİSİ

İki süperiletken arasındaki ince bir izolasyon bölgesinden akan tünel akımı, 1962 yılında Brian Josephson tarafından matematiksel olarak şu şekilde ifade edilmiştir [1];

$$I = I_0 \sin\left(\frac{4\pi e}{h} \int V dt\right)$$

Formülde I , eklem akımı, I_0 eklem için sabit olan kritik akım, V eklem gerilimi ve e/h ise elektron yükünün Planck sabitine oranıdır. Eşitlikten de görüleceği gibi, bir V dc gerilimi eklem uygulandığında tünel akımı $f = \frac{2eV}{h}$ frekansıyla osilasyona başlayacaktır. Osilasyon katsayısı $2e/h$ yaklaşık 484 GHz/mV değerindedir. Çok yüksek ve çok düşük seviyedeki frekans osilasyonlarını doğrudan gözlemlemek oldukça zordur. Bununla beraber eğer uygulanan gerilim f frekansında bir ac gerilim ise, eklem osilasyonu uygulanan frekansın fazına kilitlenme yönünde eğilim gösterir. Sistem f harmonikleri için de aynı etkiyi gösterir. Bu durumda eklem gerilimi $V = n \frac{hf}{2e}$ olarak ifade edilmektedir (n bir tamsayıdır). Ac Josephson etkisi olarak bilinen bu etki, eklem akım-gerilim (I-V) eğrisinde sabit gerilim basamakları olarak gözlemlenir. Şekil 1, bir eklem I-V grafiğini göstermektedir.



Şekil 1 Mikrodalga gücün uygulandığı durumda bir Josephson eklemının akım-gerilim karakteristiği

Elde edilen Josephson gerilimi V , adım sayısı n ve uygulanan f frekansının bir fonksiyonudur. Bu nedenle Josephson eklemi ideal bir frekans-gerilim çevirici olarak adlandırılır.

Josephson eklem sistemi gerilim ölçümlerinde primer standart olarak kabul edilmiş ve Josephson gerilimi şu formülle ifade edilmiştir:

$$V = n \frac{f}{K_{J-90}}$$

K_{J-90} Josephson sabiti olarak adlandırılır ve 1990 yılında yapılan bir anlaşma ile uluslararası değeri 483 597.9 GHz/V olarak kabul edilmiştir[2,3]. Josephson gerilimi formülden de görüldüğü gibi sıcaklık, süperiletken materyaller ve Josephson eklem tipinden bağımsızdır.

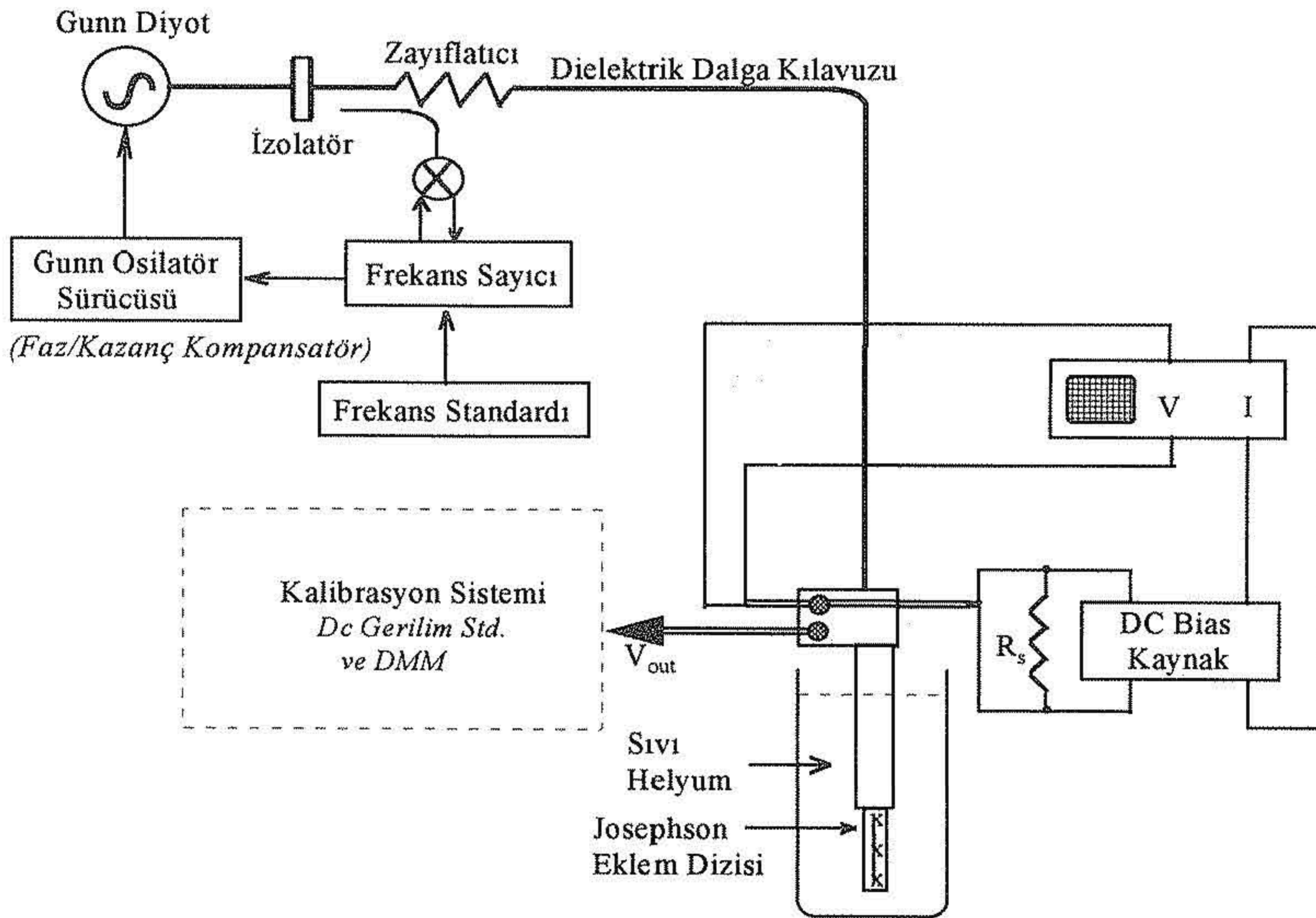
3. JOSEPHSON GERİLİM STANDARDI SİSTEMİ

Sistem, Josephson eklem dizisi, dizinin monte edildiği prob, diziyeye güç uygulayan mikrodalga kaynağı, frekansı kontrol eden bir sayıcı, adım sayısını belirleyen dc bias kaynağı ve uygun çalışma noktasını gözlemek için kullanılan bir osiloskoptan oluşmaktadır. Şekil 2'de başlıca elemanları içeren Josephson gerilim standardı sistemi görülmektedir. Josephson eklem dizisi entegresi manyetik olarak ekranlanmış prob içine yerleştirilmiş ve sıvı helyum içine daldırılmıştır. Eklem dizisine gerekli güç, çalışma frekansı 70-100 GHz arasında olan Gunn diyodu tarafından sağlanır. Frekans sayıcı(counter) Gunn diyot frekansını ölçerek, iç veya dış frekans referansına fazını kilitler. DC akım kaynağı ve düşük frekanslı üçgen dalga kaynağı entegreye temel akımı sağlar. Osiloskop, bias akımı ile dizi gerilimi karakteristiğini görüntülemekte kullanılır. Bu karakteristik diziyeye uygulanan optimum gücün ayarlanması için kullanılmaktadır.

3.1. Prob

Şekil 3’de Josephson dizisini soğutmada ve rf ve manyetik alanlardan korunmasında kullanılan bir prob görülmektedir. Mikrodalga güç, Josephson dizisi entegresine düşük ısı ve düşük mikrodalga kayıplarına sahip dalga kılavuzu üzerinden uygulanmaktadır. Mikrodalga kaybı 1V entegresi için 6 dB, 10V entegresi için ise 4 dB’den az olmalıdır. Uygun dalga kılavuzu çelik olabileceği gibi dielektrik de olabilmektedir. Dielektrik dalga kılavuzları pahalı olmalarına rağmen, 2 dB’den düşük kayıplarıyla probun daha uzun süre Helyum içinde muhafazasını sağlayabilmektedirler. Bu sebeple dielektrik dalga kılavuzları, çelik tip dalga kılavuzlarına nazaran daha çok tercih edilmektedir.

Sabit gerilim adımları arasında gürültü nedeniyle oluşan atlamalar (kaymalar), entegrenin tamamen rf ve manyetik ekranla kaplanması ve entegreye gelen bütün bağlantıların probun girişinde filtrelenmesi ile önlenir.



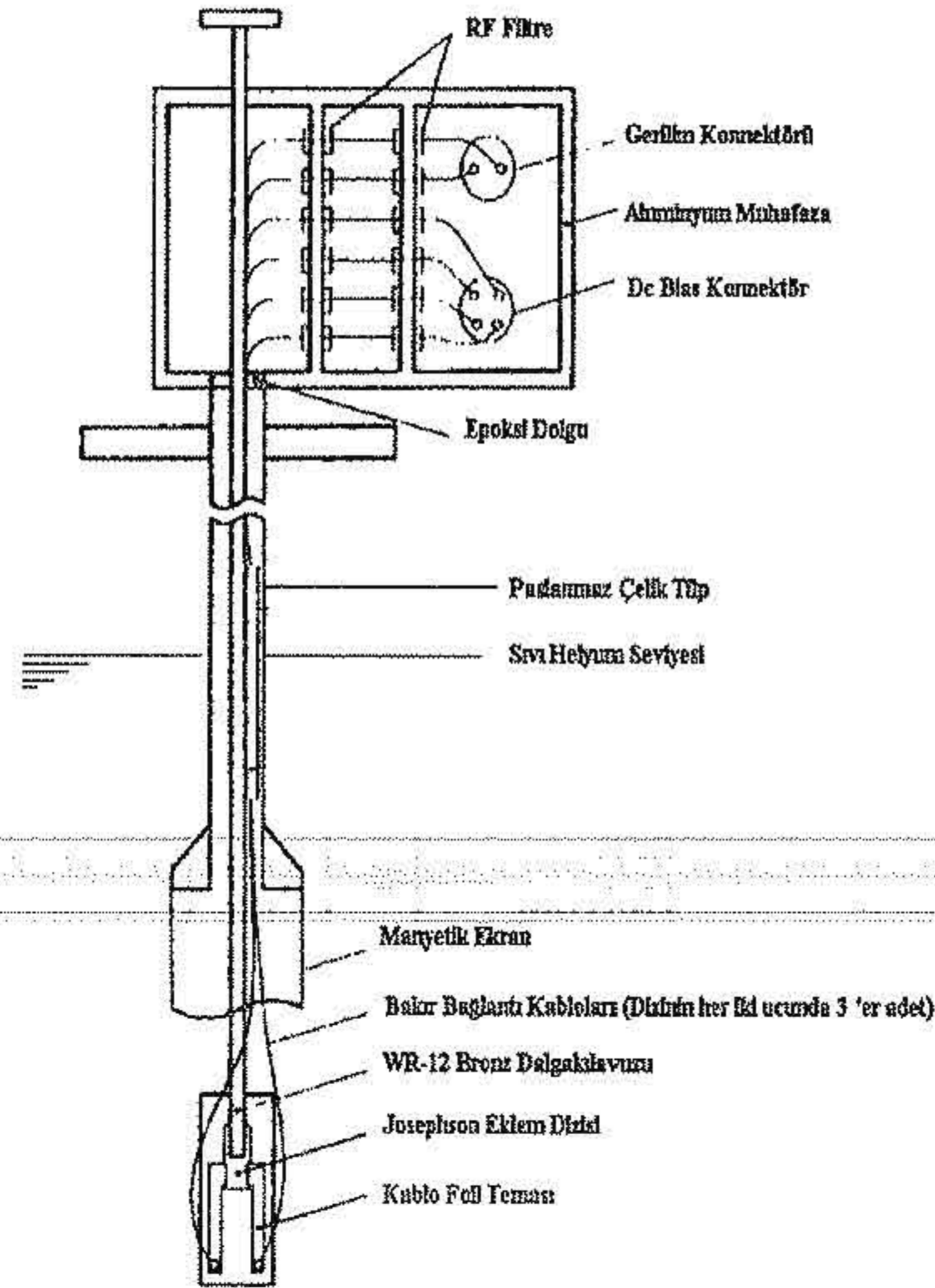
Şekil 2 Josephson Gerilim Standardı Sistemi blok şeması

Eğer dizi gerilimi doğrudan voltmetre ile ölçülecekse, referans çıkış uçlarına da düşük - frekans filtresinin eklenmesi gerekmektedir . İstenmeyen toprak döngüsünün önlenmesi için mikrodalga kaynak ve mikser probdan izole edilir.

Isıl gerilim hatalarının minimize edilmesi için prob içinde bakır ısıçift kablosu kullanılmalıdır. Prob içinde her iki yönde 3 kablo olmak üzere 6 adet kablo kullanılır. Bu 6 kablonun 4'ü bias akımının uygulanması ve I-V grafiğinin osiloskopta gözlenmesi amacıyla kullanılır. Diğer 2 kablo ise dizi gerilim çıkışları içindir.

3.2. Mikrodalga Güç Kaynağı

Mikrodalga güç kaynağı 70-100 GHz arasında 40-60 mW güç sağlayan Gunn diyottur. Dizi için gerekli uygun güç, bir zayıflatıcı (attenuator) kullanılarak kontrol edilir ve optimum çalışma noktası belirlenir. Josephson etkisinin matematiksel ifadesinde de görüldüğü gibi dizi geriliminin doğruluğu doğrudan frekans doğruluğuna bağlıdır. Bu nedenle frekans yeterli doğruluk ve hassasiyette kontrol edilmelidir. Frekans, faz kilitleyici sayıcı ile ölçülür ve geri besleme sinyali frekansı stabilize etmek için sürücü üzerinden gunn diyoda uygulanır.



Şekil 3 Josephson dizisinin sıvı helyum içinde soğutulmasında kullanılan prob

3.3. Bias ve İzleme Devresi

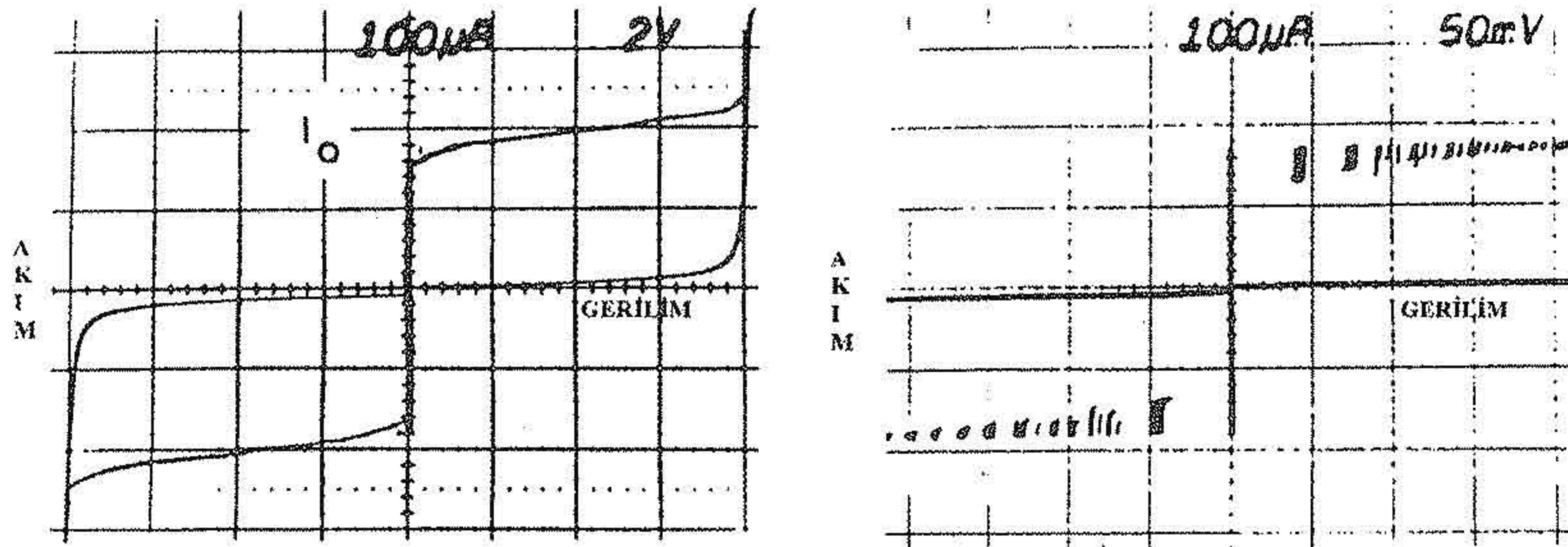
İstenilen gerilim adımının elde edilmesi için çalışma noktasını belirleyen bias devresi, dc offset ve üçgen dalga kaynağından oluşmaktadır. Dc offset oldukça kararlı ve ayarlanabilir. Otomatik olarak kontrol edilebileceği gibi, doğrudan kullanıcı tarafından da ayarlanabilir. Bir osiloskop dizinin I-V karakteristiğini gözlemek için kullanılır.

4. JOSEPHSON SİSTEMİNİN UYGUN ÇALIŞMA KOŞULLARI

Sistemin çalıştırılması, Josephson eklem dizisinin uygun olarak soğutulması, diziye uygun frekans-gücün uygulanması ve istenen Josephson gerilimi için uygun adımın elde edilmesi aşamalarıyla gerçekleştirilir.

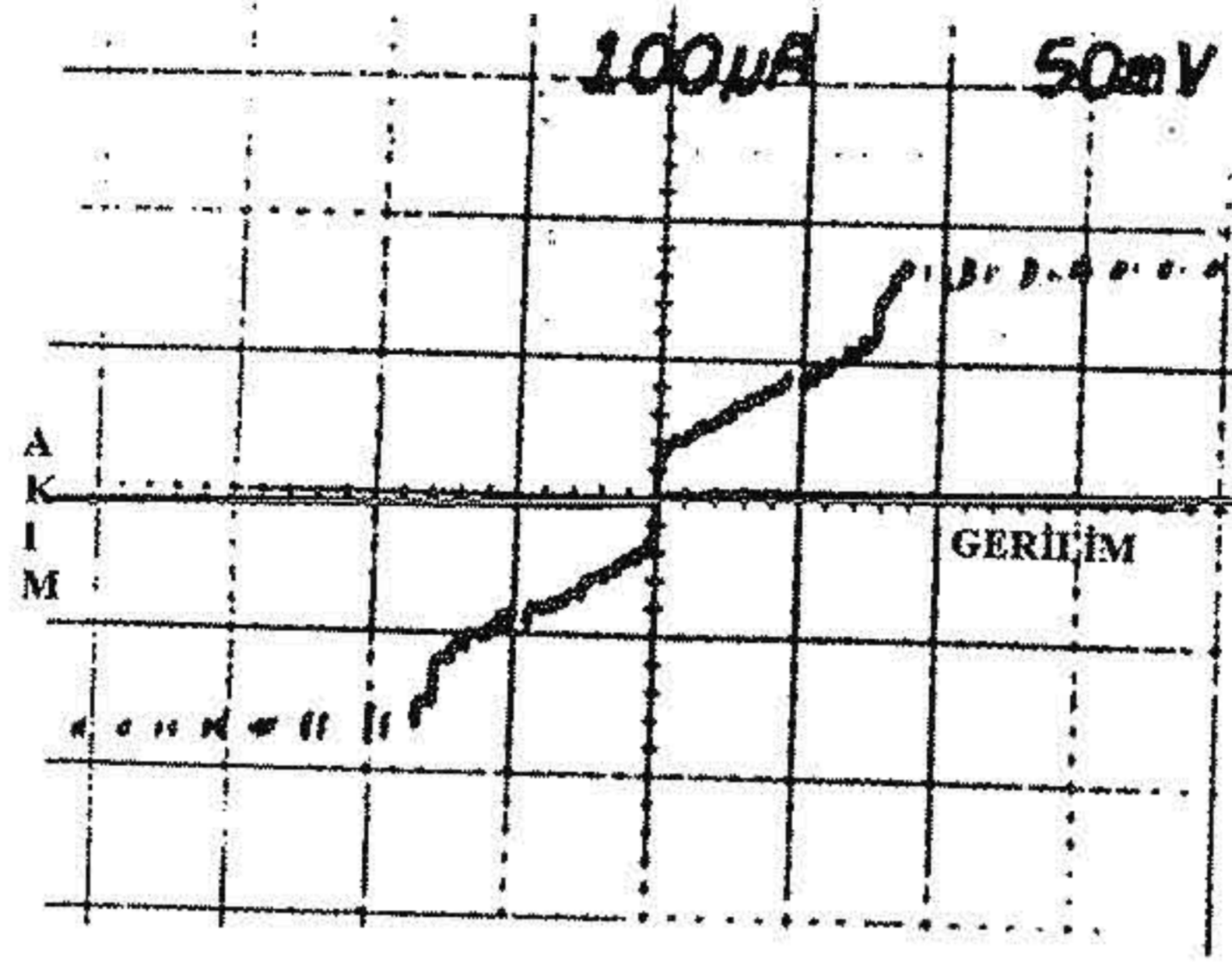
4.1. Soğutma

Soğutma işleminde, prob, sıvı helyum içine yavaş yavaş daldırılmalıdır. Bu işlem sırasında prob bağlantıları çıkarılmış olmalıdır. Dizinin helyum içine hızlı daldırılması dizide manyetik akı etkileşimi oluşmasına, dolayısıyla sistem performansının düşüşüne sebep olacaktır. Bu nedenle daldırma-soğutma işleminden sonra dizinin I-V grafiği gözlenir. Şekil 4, sisteme mikrodalga gücün uygulanmadığı durumda, osiloskopta iki değişik gerilim ölçeğinde gözlenen normal dizi karakteristiğini, Şekil 5 ise, dizinin sıvı helyum içine hızla daldırılmasından oluşan manyetik akı etkisinin sebep olduğu bozulmayı göstermektedir.



Şekil 4 Mikrodalga gücün uygulanmadığı durumda normal I-V karakteristiği

Bu durumda prob helyum içinden çıkarılmalı ve dizi dikkatlice ısıtılmalıdır. Entegredeki herhangi bir hızlı yoğunlaşma-nemlenme diziye zarar verebileceğinden dolayı prob helyum içinden çıkarıldıktan sonra 10 dakika kadar kurutulmalıdır. Entegrenin nemli ortamda tutulması da aynı şekilde diziye zarar verebilir.



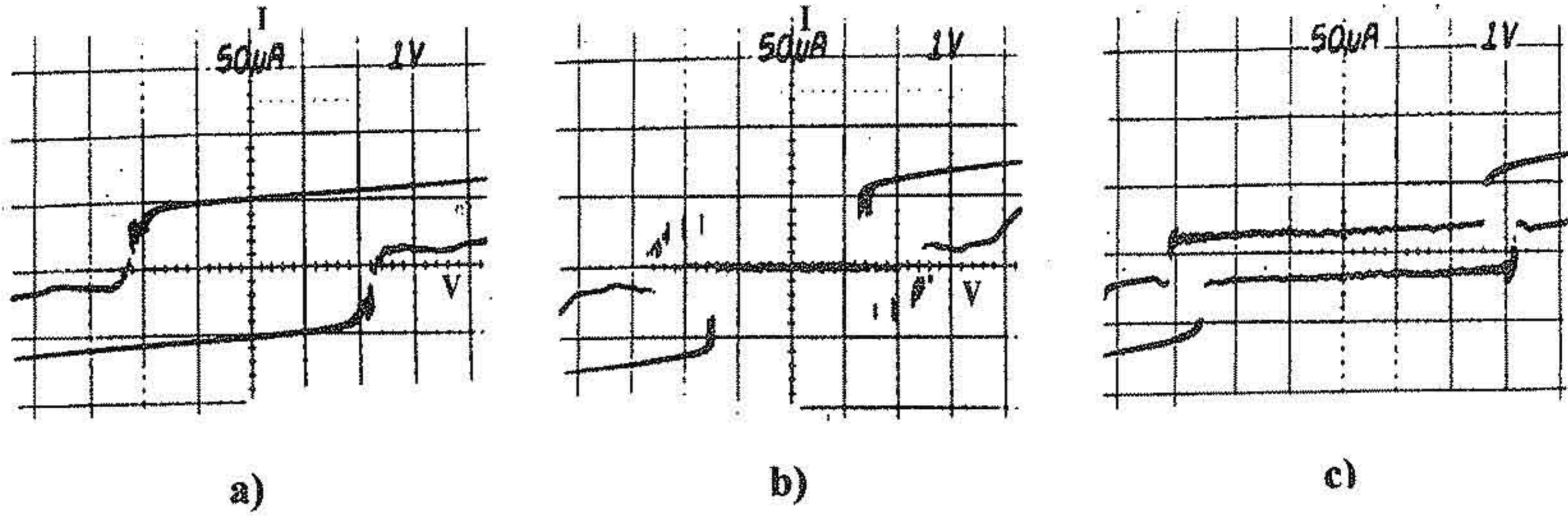
Şekil 5 I-V karakteristiğinde manyetik akıların oluşturduğu bozulma

Metal dalga kılavuzlarının ısı iletkenliği oldukça fazla olduğundan, fazla helyum kaybına sebep olmaktadır. Bu nedenle dizi soğutulmadan önce sıvı helyum seviyesi kontrol edilmeli, gerektiğinde helyum takviyesi yapılmalıdır.

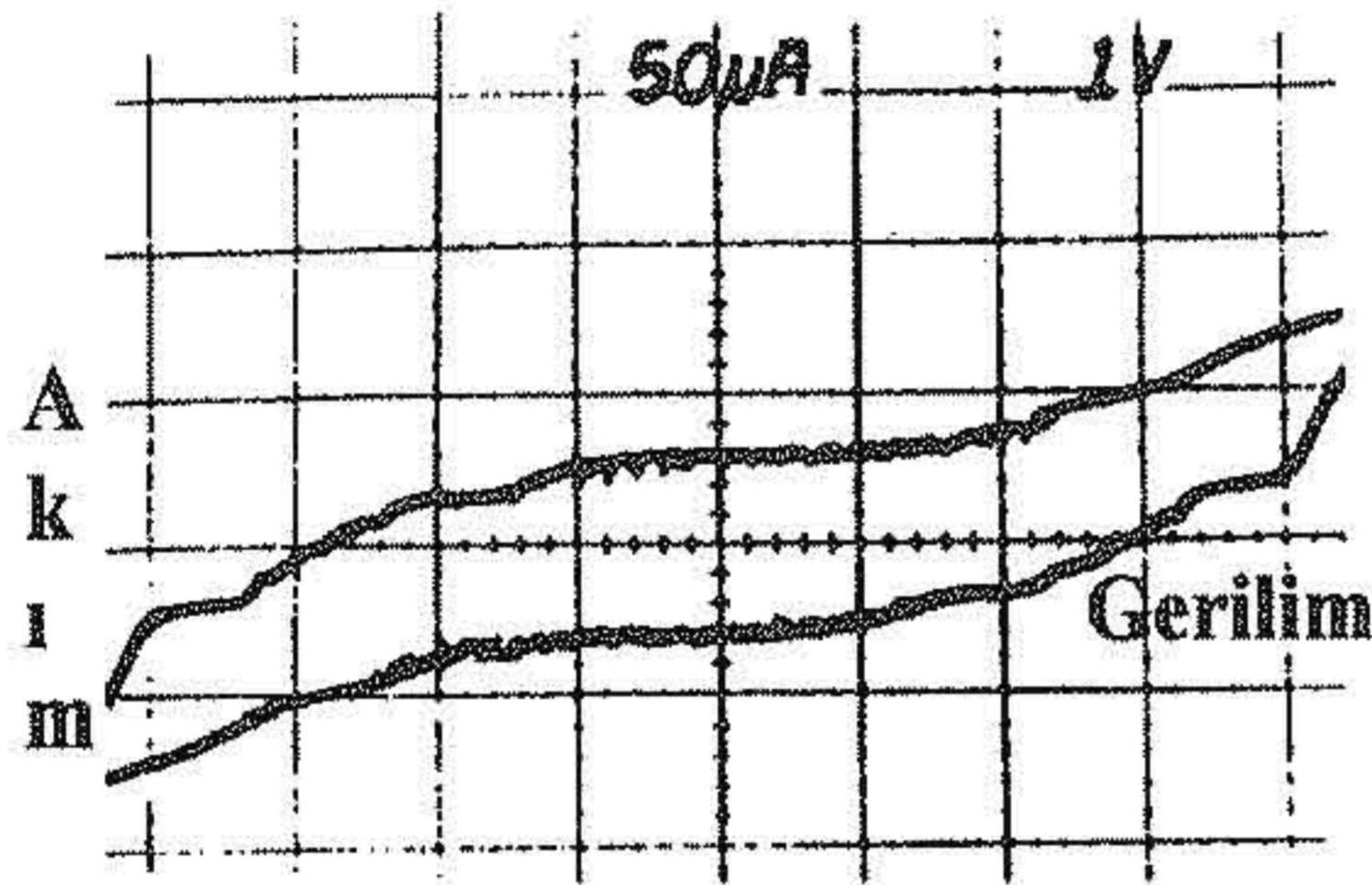
4.2. Optimum Güç ve Frekans Ayarlaması

Frekans ve gücün ayarlanmasında dikkat edilecek iki nokta vardır: 1) Dizinin I-V grafiğinde gerilim eksenini, istenen çalışma geriliminde kesilmelidir. (1V, 10V gibi) 2) Grafikte alt ve üst kollar arasında kalan alan olabildiğince düzgün olmalıdır. Gerilim ekseninin kesim noktası, diziden alınabilecek maksimum kararlı gerilim değerini verir. Şekil 6, diziyeye uygulanan gücün artırılması durumunda gözlenen I-V grafiklerini göstermektedir. Verilen örnekte görüldüğü gibi, düşük güç değerinde 2V'a kadar sabit gerilim adımları elde edilirken, orta güçte bu değer 2.5V'a, yüksek güç değerinde ise elde edilebilecek maksimum sabit gerilim adımı 3V'a çıkmıştır.

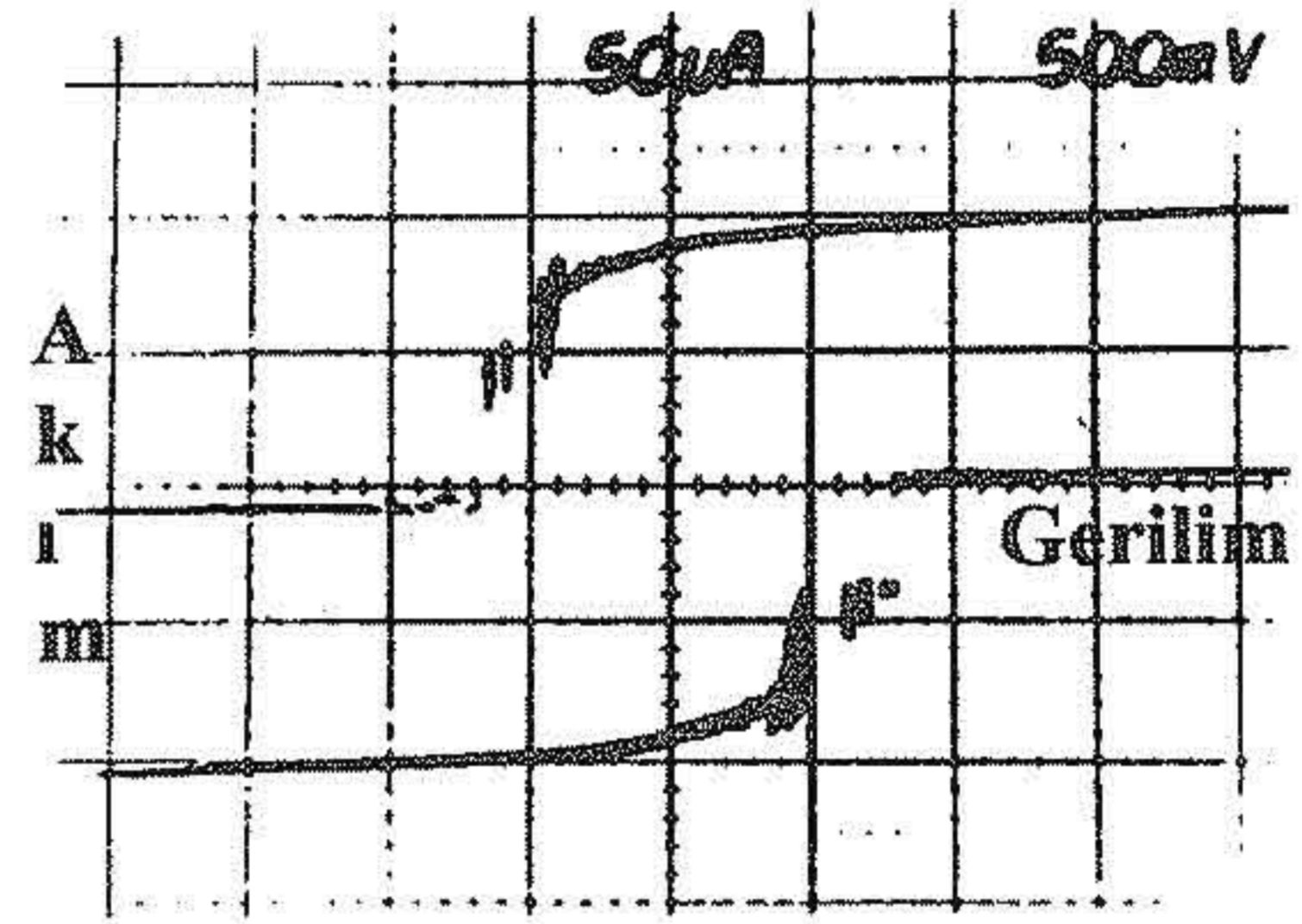
Diziyeye mikrodalga gücün çok fazla uygulanması durumunda, oluşan gerilim adımları oldukça küçük ve kararsızdır. Şekil 7, bu durumdaki bir dizinin I-V karakteristiğini göstermektedir. Diziyeye çok az gücün verilmesi durumunda ise diziden istenen kararlı gerilim adımları elde edilemez. Şekil 8 de, düşük güç uygulanan bir dizinin I-V grafiği gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, bu durumda diziden elde edilebilecek maksimum kararlı gerilim değeri istenen değerden küçüktür (örnekte 0.5 voltur). Sonuç olarak her iki durumda da sistemden beklenen performans sağlanamaz. Bu nedenle diziyeye optimum güç ve frekans uygulanmalıdır.



Şekil 6 a) Düşük b) Orta c) Yüksek rf güç seviyelerinde Josephson dizisi I-V karakteristikleri

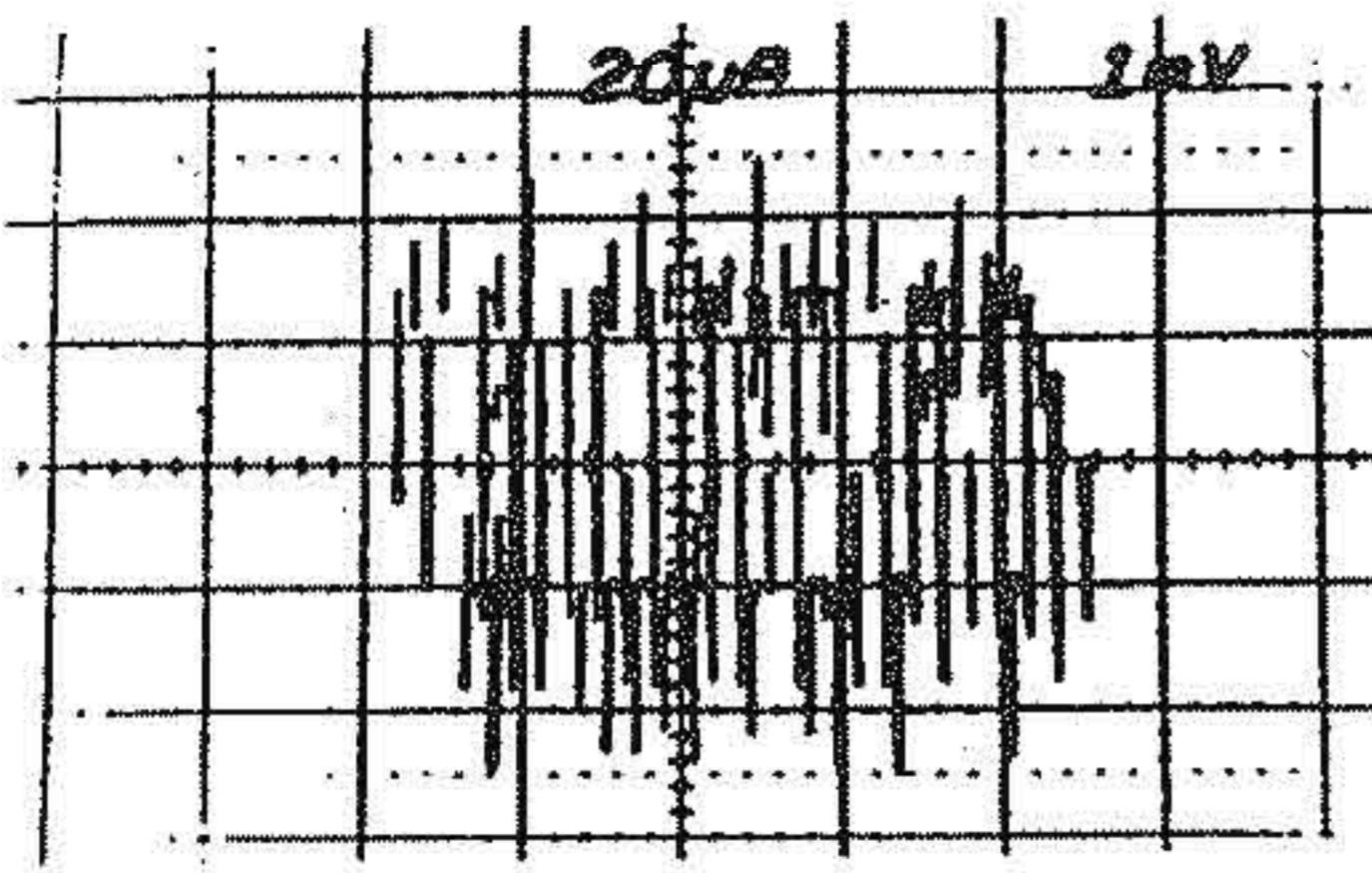


Şekil 7 Yüksek güçte I-V grafiği



Şekil 8 Düşük güçte I-V grafiği

Optimum güç ve frekans ayarlaması için uygulanacak en iyi yöntem, şekil 8 deki grafik elde edilinceye kadar güç ayarlaması yaptıktan sonra istenen gerilim değeri gerilim eksenini kesinceye kadar frekans ayarlaması yapmaktır. Daha sonra güç üzerinde tekrar ayar yapılır. İyi bir frekans-güç ayarlaması sonucu gözlemlenen I-V karakteristiği şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9 İdeal I-V karakteristiği

4.3. Uygun Gerilim Adımının Seçimi

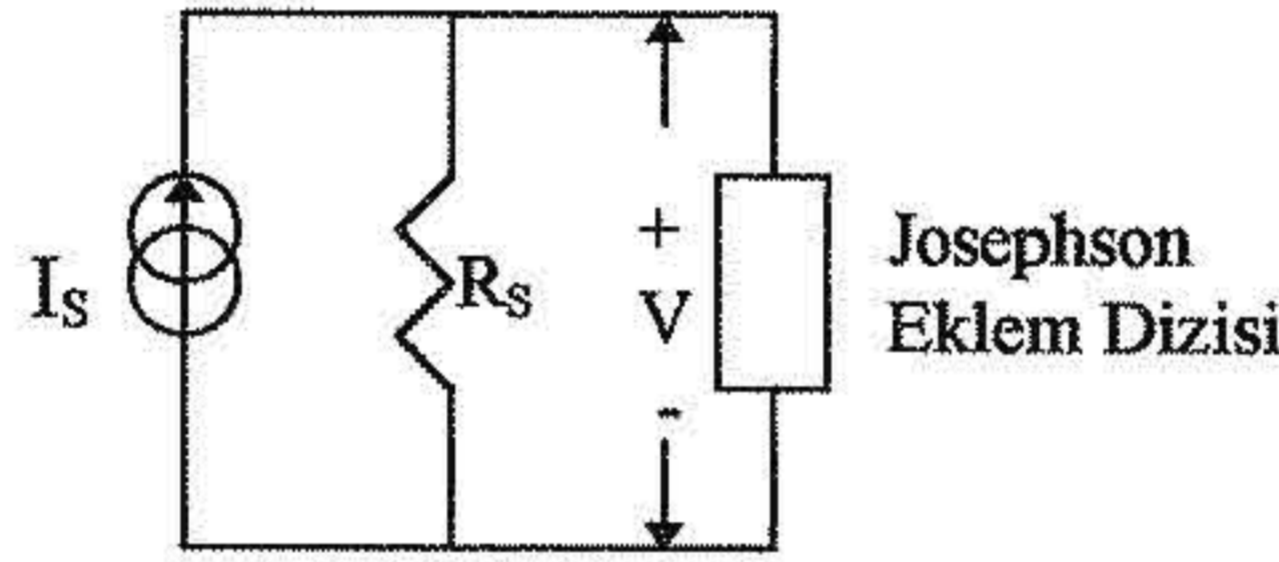
Josephson Gerilim Standardı ikincil seviye bir gerilim standardı kalibrasyonunda kullanıldığında, Josephson geriliminin kalibre edilecek standardın gerilim değerine olabildiğince yakın olarak elde edilmesi gerekmektedir. Bu ise $V = n \frac{hf}{2e}$ formülünde görüldüğü gibi uygun f ve n değerlerinin seçilmesi ile mümkündür.

İstlenen Josephson gerilimi şu şekilde elde edilir: Öncelikle dizi için optimum güç ve frekans değerleri belirlenir ve sisteme uygulanır. Daha sonra istenen gerilim adımının seçimi için bias kaynaktan sağlanan akım ayarlanır. Ancak istenen adımın yakalanması olasılığı düşük olduğundan bu işlem oldukça uğraş gerektirmektedir.

Bu problemin çözümü, dc bias kaynağına paralel olarak bağlanan bir R_s direnci ile sağlanır. Bu durumda dizi gerilimi ve akımının, R_s direnç ve dc bias akımına bağlı olarak ifadesi,

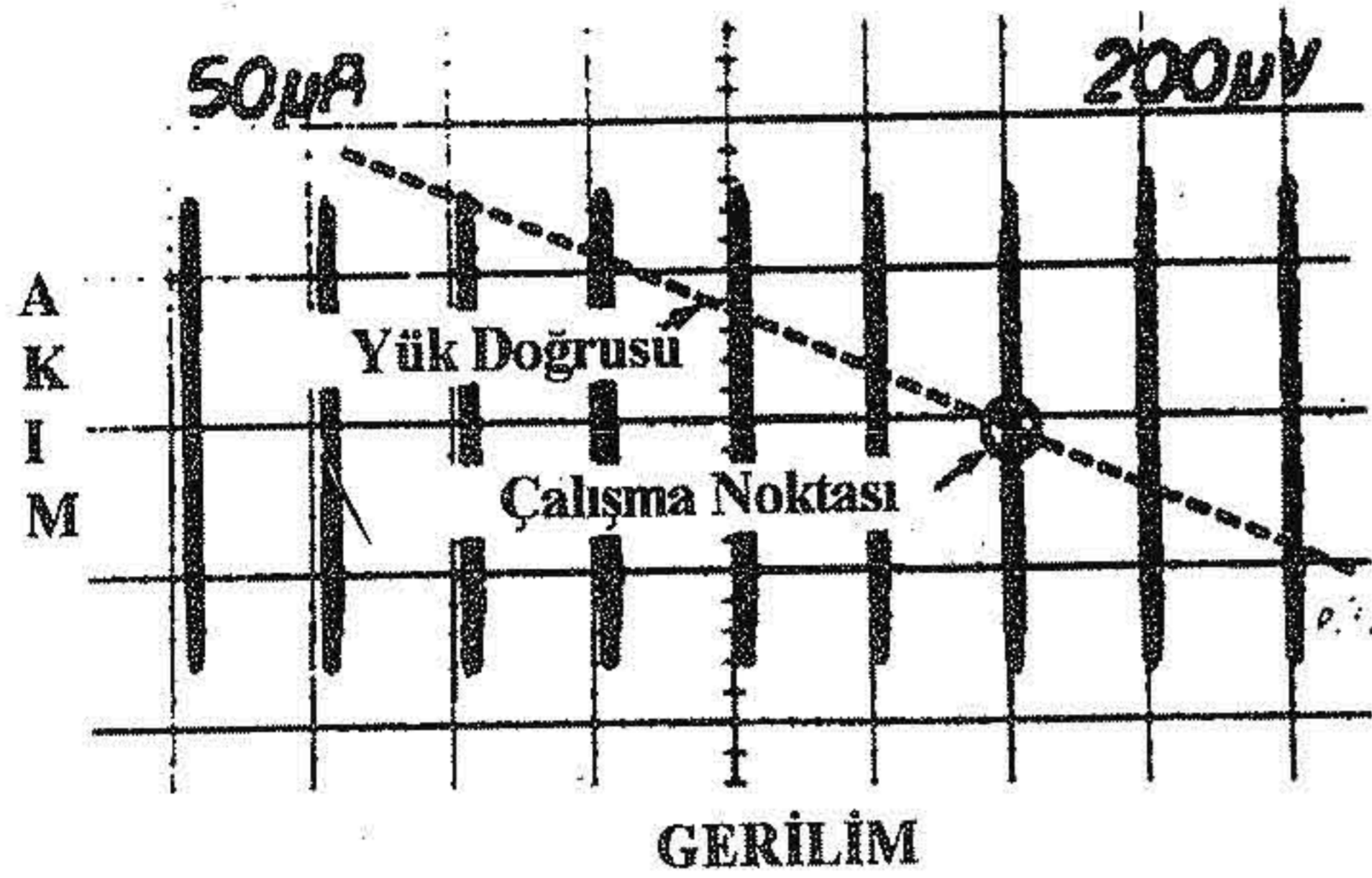
$$I = I_s - \frac{V}{R_s}$$

şeklindedir. Şekil 10 da basitleştirilmiş devre verilmiştir.



Şekil 10 R_s direncinin gerilim adımının elde edilmesinde kullanılması

Teoride dizinin çalışma noktası, dizinin I-V grafiği ile yukarıda verilen yük doğrusunun kesişim noktasıdır. Şekil 11, yük doğrusu ve I-V karakteristiğini aynı grafikte göstermektedir. Dizinin çalışma noktası sıfır-akım ($I=0$) ekseninde oluşan sabit gerilim adımları göz önüne alındığında $V = I_s \times R_s$ olarak belirlenir. Bu nedenle sistemden istenen Josephson gerilimi direnç üzerinde bu değere yakın bir gerilim oluşuncaya kadar bias akımının ayarlanması suretiyle elde edilebilmektedir. Paralel direncin diziden ayrılması durumunda, dizi çalışma noktası direnç üzerinde oluşan gerilime yakın bir değerde kalmaktadır. Bu şekilde istenen gerilim değerine en yakın gerilim adımına bir kaç tekrarlama ile ulaşılabilir.



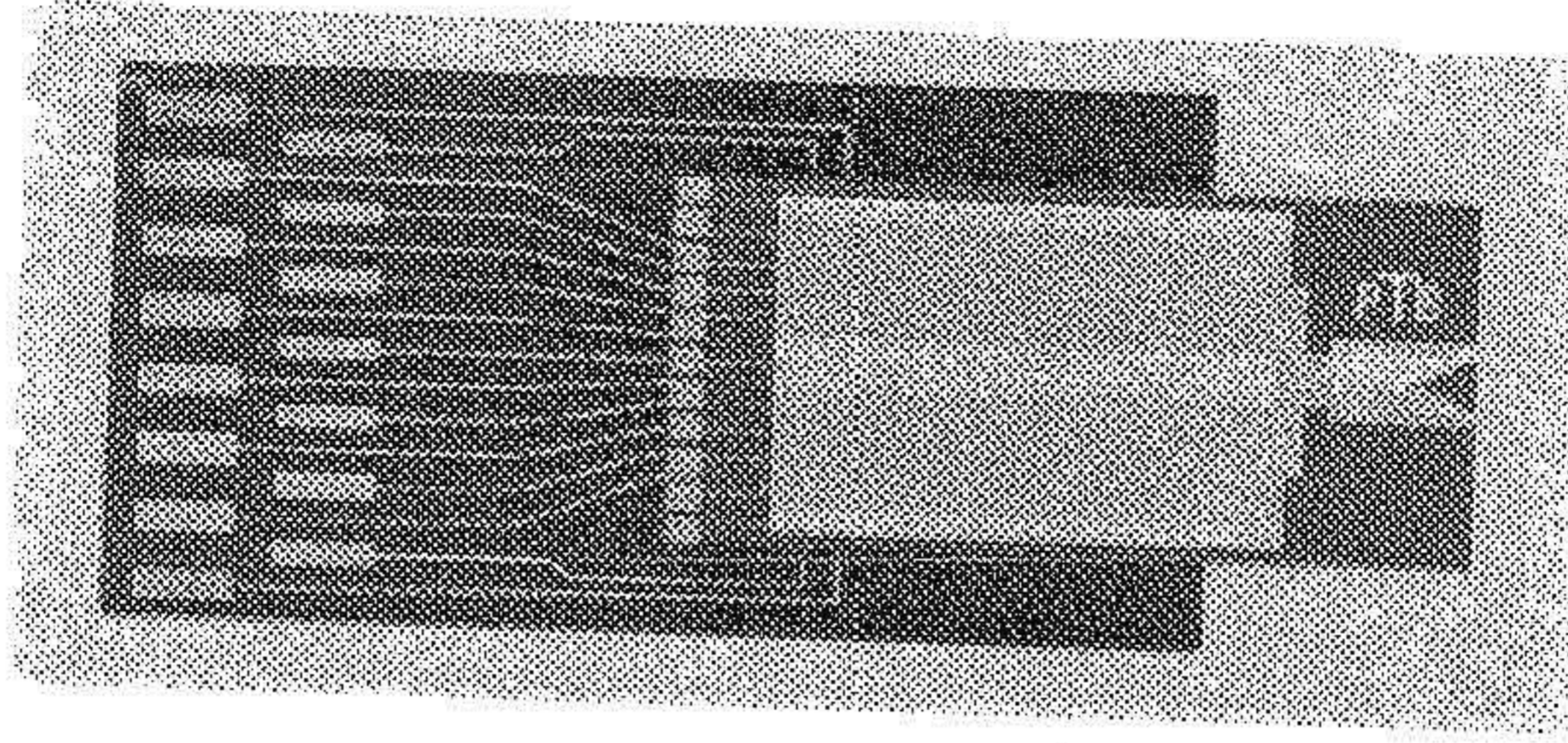
Şekil-11. Josephson eklem dizisi yük doğrusu ve I-V grafiği

Yöntemde kullanılan R_s -direnç değeri oldukça önemlidir. R_s değerinin 10Ω ' un altında olması durumunda, dizinin dinamik bölgesinde bulunan çalışma noktası elde edilecektir. Bu durumda sabit gerilim adımları arasındaki atlamalardan dolayı sistemden istenen kararlılık sağlanamaz. Bu nedenle, dizinin I-V grafiğinde görülen gerilim adımlarının eksene tam dik olmalarına dikkat edilmelidir. Gerilim adımlarında görülen eğim, dizinin dinamik bölgesinde çalışmakta olduğunu gösterir.

Yöntem sunduğu avantaja rağmen yine de zor ve zahmetli gözükse de, bilgisayar kontrollü bir sistem, istenen gerilim adımının elde edilmesinde kolaylık sağlamaktadır.

5. UME ' DE KURULAN JOSEPHSON SİSTEMİ

Ulusal Metroloji Enstitüsü Gerilim Laboratuvarı'nda kurulmakta olan Josephson gerilim standardı sisteminin temelini, -12 V ile $+12 \text{ V}$ arası gerilimler üretebilen eklem dizisi çipi oluşturmaktadır (Şekil 12). PTB (Almanya Metroloji Enstitüsü) tarafından tasarlanıp üretilen bu dizide her biri 3000 Josephson ekleminden oluşan 4 hat bulunmaktadır. 1996 yılında bu 10 V çiplerinden bir örnek, BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) tarafından test edilmiş ve çıkış geriliminin beklenen değeri sağladığı saptanmıştır. 10 V çipinin 1 V çipine yakın kararlılığa sahip olduğu ve 10 V adımı genişliğinin $20 \mu\text{A}$ 'den fazla olduğu belirtilmiştir.



Şekil 12. PTB tarafından optimize edilen 10 V çipi (uzunluk : 2cm.)

6. SONUÇ

UME Gerilim Laboratuvarı'nda Josephson eklem sisteminin kurulmasıyla, daha önce 10^{-6} mertebesinde olan DC gerilim belirsizliği 10^{-9} seviyesine düşmüş olmakta, Weston pilleri ve Zener referans standartları gibi ikinci seviye DC gerilim standartlarının da 10^{-7} mertebesinde belirsizlikle kalibrasyonu mümkün olmaktadır.

KAYNAKLAR :

- [1] Josephson, B.D., Phys. Lett. 1, 251 (1962).
- [2] Taylor, B.N., J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 94, 2 (1989).
- [3] Belecki, N.B., Dziuba, R.F., Field, B.F., and Taylor, B.N., NIST Tech. Note 1263, 1989.