

**T.C.
KAFKAS ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
FİZİK ANABİLİM DALI**

**AÇIK HAVA KOZMİK İŞİN DEDEKTÖRLERİ İÇİN SiPM KAZANÇ
KARAKTERİSTİĞİ ve KALİBRASYONU**

İsmail Okan ATAKİŞİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**DANIŞMAN
Prof. Dr. Mithat KAYA**

**OCAK-2014
KARS**

T.C. Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi İsmail Okan ATAKIŞI'nın Prof. Dr. Mithat KAYA'nın danışmanlığında yüksek lisans tezi olarak hazırladığı "Açık hava kozmik ışın dedektörleri için SiPM kazanç karakteristiği ve kalibrasyonu" adlı bu çalışma, yapılan tez savunması sınavı sonunda jüri tarafından Lisansüstü Eğitim Yönetmeliği uyarınca değerlendirilerek oy birliği/çokluğu ile kabul edilmiştir.

22/01/2014

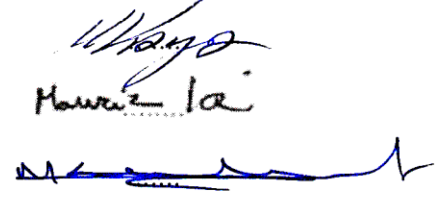
Adı ve Soyadı

Başkan: Prof. Dr. Mithat KAYA

Üye: Prof. Dr. Maurizio IORI

Üye: Prof. Dr. Mevlüt KARABULUT

imza



Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun/....../2014 gün ve/
.....sayılı kararı ile onaylanmıştır.

.....

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Bu çalışma Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim dalında yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır.

Bu çalışmada, TAUWER Deneyi kapsamında kullanılacak silikon fotoçoğaltıcıların (SiPM) kazanç karakteristiğinin analizi ve 2013 Haziran`ında yenilenen , İsviçre`de Jungfrau Sphinx Gözlemevi`ndeki prototipin yapılan karakter analiziyle sabit kazançta çalışmasını sağlayan kalibrasyonu konu edilmiştir. Bu çalışmalar Erasmus Staj Hareketliliği programıyla Roma Sapienza Üniversitesi Fizik Bölümünde gerçekleştirilmiştir.

Tez çalışmamda ve Yüksek Lisans eğitimimde bilgisi ve değerli tavsiyeleriyle yol gösteren, sabırla öğrenmemi bekleyen, eğitim sürecime olan katkılarını her zaman anacağım değerli bilim insanı, Sayın Pof. Dr. Mithat KAYA`ya ve tez konusu deneyler gerçekleştirirken laboratuvarında çalıştığım, bilgisi ve deneyimiyle verimliliğimi arttıran değerli bilim insanı, Sayın Prof. Dr. Maurizio IORI`ye içten teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca maddi manevi yardımını esirgemeyen, her daim yanımda olan Değerli Ailem`e bu çalışmamı ithaf ederim.

Kars - 2014

İsmail Okan ATAKIŞI

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. YARIİLETKEN DEDEKTÖRLER.....	2
2.1 Temel Yarıiletken Özellikleri	2
2.1.1 Enerji Bandı Yapısı.....	3
2.1.2 Yarı İletkenlerde Yük Taşıyıcılar	5
2.1.3 Esas Yük Taşıyıcı Yoğunluğu	6
2.1.4 Hareketlilik (Mobility)	7
2.1.5 Elektron-boşluk Birleşmesi	7
2.2 Katkılı Yarıiletkenler	9
2.3 PN Eklemler ve Arınma Bölgesi	12
2.4 Ters Beslemeli Pn Eklemler	13
2.5 Çığ Çoğalması	14
2.6 Kırılma Voltajının Bağlılığı	16
2.7 Çığ Fotodiyotlar	17
2.8 Çığ Fotodiyotlarda Sinyal Sönümü	19
3. SİLİKON FOTOÇOĞALTICILAR.....	21
3.1 SiPM Karakteristiği	22
3.1.1 Sinyal Çıkışı	23

3.1.2 SiPM Kazancı.....	25
3.1.3 Elektronik Gürültü (Dark Counts)	26
3.1.4 Foton Yakalama Verimliliği.....	27
4. SiPM'LERİN SICAKLIĞA GÖRE KAZANÇ KARAKTERİSTİĞİNİN ARAŞTIRILMASI	30
4.1 Deneyde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri.....	31
4.2 Deneyin Yapılış Yöntemi	32
5. DEĞİŞEN SICAKLIKLARDA SiPM'LERDE KAZANÇ KONTROL EDİLEBİLİRLİĞİ	35
6. SICAKLIK DEĞİŞİMİNE KARŞIN KENDİLİĞİNDEN KALİBRASYON YAPAN SİSTEMİN GELİŞTİRİLMESİ	37
6.1 Sıcaklık Sensörleri.....	38
6.1.1 Dallas DS18S20.....	38
6.1.2 Texas LM35	38
6.2 Voltaj Regülatörü	39
6.3 Arduino	40
6.3.1 Arduino'nun Tercih Sebepleri	41
6.3.2 Çevresel Birimlerin Arduino ile Kontrolü.....	41
6.3.2.1 Arduino ile Sıcaklık Ölçümü	41
6.3.2.2 DS1820 nin Kontrolü	42
6.3.2.3 Arduino ile Voltaj Regülatörün Kontrolü.....	45
7. SONUÇ ve TARTIŞMA.....	49
7.1 SiPM Sabit Kazanç Kalibrasyonu	49
7.2 Yeni Sphinx Deney Prototipi	50
7.3 Tartışma	51
KAYNAKLAR.....	53

ÖZGEÇMİŞ.....	55
Ek-1 SiPM Tahtası Devresi ve Şeması.....	58
Ek-2 Arduino Yazılım.....	60

ÖZET

TAUWER Deneyi (TAU-neutrino multitoWER Detector Experiment) "Earth skimming" stratejisiyle tau nötrino gözlemlemeyi amaçlayan bir açık hava dedektörler dizisidir. Çok yüksek enerjili kozmik ışınların yer kabuğu ile etkileşime girdikten sonra meydana gelen tau nötrino duşlarını gözlemlemek amacıyla dizayn edilmiştir.

TAUWER Deneyi dağ eteğine kurulacak bir dizi açık hava dedektörlerinden meydana gelecektir. Bu amaçla çeşitli dedektör prototipleri kozmik akı ölçerek denenmektedir. Her bir prototip bir sintilasyon dedektörlerinden meydana gelmektedir. Sintilasyon dedektörleri temelde iki parçadan meydana gelir. Bunlardan biri sintilasyon karosu diğeri ise silikon fotoçoğaltıcıdır. Bu parçalardan fotoçoğaltıcı olarak deney kapsamınca kullanılacak SiPM performansının kararlılığı bu tezin temel motivasyonudur.

Dedektör sistemi yüksek rakımlı bölgede kurulması planlandığından farklı sıcaklıklarda kararlı çalışabilecek dedektör prototipi için SiPM karakteristiği çalışılmıştır. Bu tezde SiPM karakteristik ölçme metodu geliştirilerek, sabit kazanç kalibrasyonu için kullanılan teknik ve yöntem anlatılmıştır.

2014, 52 sayfa

Anahtar Kelimeler: TAUWER, SiPM, karakteristik, kalibrasyon

ABSTRACT

TAUWER (TAU-neutrino multitoWER) experiment is an open air experiment that aiming to use an Earth Skimming technique to detect tau neutrinos. It is designed to detect neutrino shower, which produced, by interaction of ultra-high energetic cosmic rays with earth surface.

TAUWER experiment will consist of series of towers that are planning to locate on an inclined plane of mountain surface. For this reason there is several prototypes prepared using the cosmic ray flux measurements. Each prototype consists of one scintillator detector. Basically each scintillator detector has two components. One is scintillator plates the other is Silicon photomultipliers (SiPM). Main goal of this thesis is to study characteristics of SiPM.

Since the whole Detector system is planning to run in a high altitude, the characteristics of the SiPM have been studied for different temperatures in order to keep the prototype in a stable condition. In this theses measurement of SiPM characteristics method improved and also used technic and method of constant gain calibration is discussed.

2014, 52 pages

Key Words: TAUWER, SiPM, chracteristic, calibration

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

1. Simgeler

k	Boltzmann sabiti
⁰ K	Kelvin
⁰ C	Santigrat derece
cm ²	Santimetre kare
mm ²	Milimetre kare
cm ³	Santimetre küp
mV	Mili volt
V	Volt
GHz	Giga hertz
MHz	Mega hertz
λ	Dalga boyu
ns	Nano saniye
e	Elektron yükü

2.Kısaltmalar

TAUWER	TAU-neutrino multioWER
SiPM	Silicon Photo Multiplier
Si	Silicon
Ge	Germanium
APD	Avalanche Photo Diode
ADC	Analog to Digital Converter
DAC	Digital to Analog Converter
PDE	Photon Detection Efficiency
PMT	Photo Multiplier Tube
PCB	Printed Circuit Board
SPI	Serial Peripheral Interface
SCLK	Serial Clock
MOSI	Master Output Slave Input
MISO	Master Input Slave Output
SS	Slave Select
Led	Light Emitted Diode

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 2.1 İletken, yarıiletken ve yalıtkanlarda enerji bandının yapısı	3
Şekil 2.2 Silisyumda ki kovalent bağ: (a) 0°K de bütün elektronlar kovalent bağa katılır, (b) yüksek sıcaklıklarda bazı elektronlar kovalent bağlarını kırıp balans bandından ayrılırlar.	5
Şekil 2.3 Yasak bantta tuzaklama ve yeniden birleşme sınırları	8
Şekil 2.4 (a) n-tip yarıiletken elde etmek için verici safsızlık eklenir. Verici safsızlık fazlalık elektronuyla kristal yapıyı bozar ve yasak bant da verici safsızlık seviyesi meydana getirir. (b) p-tip yarıiletken elde etmek için alıcı safsızlık eklenir. Alıcı safsızlık fazlalık boşluğuyla kristal yapıyı bozarak yasak bantda verici safsızlık seviyesi meydana getirir.	9
Şekil 2.5 Ters beslemeli pn eklem	13
Şekil 2.6 Ters beslemeli pn eklem de çığ çoğalması [2]	14
Şekil 2.7 GaAs, GaP, Si, Ge' de tek taraflı ani pn eklem için safsızlık konsantrasyonuna karşılık kırılma voltajı grafiği.Kesikli çizgi, sonrasında tünel etkisinin kırılma mekanizmasına hükmettiği maksimum katkılamaya işaret eder [3].	15
Şekil2.8 pn eklemlerde kırılma voltajının sıcaklıkla değişimi [3]	16
Şekil 2.9 Pn eklem diyotların voltaj karakteri	17
Şekil 2.10 Çığ fotodiyotlarının (APD) temel yapısı [4]	18
Şekil 2.11 Pasif sinyal sönümleme [4]	19
Şekil 2.12 Aktif sinyal sönümleme [4]	20
Şekil 3.1 Silikon fotoçoğaltıcı [5]	21
Şekil 3.2 SiPM iç yapısının şematik çizimi	22
Şekil 3.3 Işıklı ve ışiksiz SiPM sinyali ölçen düzenek	23
Şekil 3.4 Sensel30035FM model SiPM sinyal görüntüsü	24
Şekil 3.5 Led ışığı açıkken elde edilen sinyallerin minimum değerlerinin histogramı	25
Şekil 3.6 Led kapalıyken elde edilen gürültü sinyallerin sürekli görüntüsü	27
Şekil 3.7 Işığın SiPM üzerinde düşebileceği kısımlar [7]	28
Şekil 4.1 Sensel30035FM SiPM kazanç karakterinin araştırıldığı deney düzeneği	30
Şekil 4.2 SiPM tahtası ve Sensel30035FM	31
Şekil 4.3 Sensel30035FM SiPM sinyali ve sinyal değerlerinin dağılım histogramı [12]	33
Şekil 4.4 Sabit voltajda kazanç akım grafiği [12]	34
Şekil 5.1 Sensel30035FM SiPM için tek fotoelektron başına 1.36 mV kazanç için besleme voltajı ve sıcaklık değerleri [12]	35

Şekil 6.1 Sensel30035FM SiPM kazanç kalibrasyonun test düzeneği	37
Şekil 6.2 Voltaj düzenleyici PCB	39
Şekil 6.3 Arduino modelleri [16]	40
Şekil 6.4 (a) LM35 analog sıcaklık sensörünün kendisi, (b) LM35 analog sıcaklık sensörü için gerekli devre şeması	42
Şekil 6.5 Soğutucunun sürekli açık olduğundaki sıcaklık farkı	44
Şekil 6.6 Soğutucunun sürekli kapalı olduğundaki sıcaklık farkı	44
Şekil 6.7 Soğutucunun sürekli açık olduğundaki sıcaklık farkı	45
Şekil 6.8 SPI veri yolunun tekli ve çoklu efendi köle bağlantı şeması [17]	46
Şekil 6.9 Max1932 nin çıkış voltajı değerlerinin byte karşılıkları	47
Şekil 7.1 SiPM sisteminin değişen sıcaklıklardaki kazanç grafiği	49
Şekil 7.2 Sphinx istasyonuna kurulan deney düzeneği	51

1. GİRİŞ

TAUWER Deneyi (TAU-neutrino multitoWER Detector Experiment) çok yüksek enerjili tau nötrino duşlarını gözlemlemek amacıyla dizayn edilen, birçok ülkeden bilim insanlarının katıldığı bir çalışma grubudur.

Deney kapsamında TAU-neutrino'ların tespiti için dağ eteğine kurulacak, bir dizi açık hava sintilasyon dedektörleri tasarlanmaktadır. Sintilasyon dedektörlerinin yapısı, temelde içinden parçacık geçtiğinde ışıdayacak sintilasyon malzemeleri ve ışık yakalayıp çoğaltma görevindeki fotoçoğaltıcılardan oluşmaktadır.

Bu tezde çalışılan ana konu, İsviçre'de Jungfrau Sphinx Gözlemevi İstasyonuna 2013 Haziran'da yerleştirilen silikon fotoçoğaltıcıların (Silicon Photo Multiplier, SiPM) karakteristiği ve farklı sıcaklıklarda sabit kazanç kalibrasyonudur.

Tezin ikinci bölümünde, SiPM karakteristiğini anlamayı sağlayacak yarıiletken teknoloji üzerinde SiPM'lerin çalışma dinamiklerini anlamamızı sağlayacak şekilde durulmuştur. Üçüncü bölümünde, TAUWER Projesi Kapsamında Sintilasyon dedektörlerinin Fotoçoğaltıcısı olarak görev yapacak SiPM karakteristiği ve onun temel özellikleri tanımlanıp açıklanmıştır. Dördüncü bölümde, TAUWER Projesi kapsamında kullanılacak Sense130035FM SiPM'lerin sıcaklık karşısındaki kazanç değerinin ortaya koyacak deney sistemi, takip edilen yöntem ve sıcaklığa karşı kazanç değişimi açıklanmıştır. Beşinci bölümde SiPM kazancının sıcaklık değişimlerine karşı sabit tutulup tutulamayacağı tartışılmıştır. Altıncı bölümde sabit SiPM kazancı için kendiliğinden kalibrasyon yapacak sistemin bileşenleri ve nasıl kullanıldıkları açıklanmıştır. Yedinci bölümde, SiPM'in değişen sıcaklık koşullarında sabit kazançta çalışabilmesi için dizayn edilen sistemin doğru şekilde SiPM kazancını kalibre edip etmediğinin sonuçları sunulmuş sonrasında yapılması gerekenler tartışılmıştır.

2. YARIİLETKEN DEDEKTÖRLER

Bu tür dedektörler yarıiletken maddeden yapılmış olup en yaygın kullanılanları Silisyum (Si) ve Germanyumdur (Ge). Bu tür dedektörlere aynı zamanda katihal dedektörleri de denmektedir. İlk olarak 1960'lar da ticari olarak satışa sunulmaya başlanmış olup, yüksek enerji çözünürlükleriyle yüklü parçacık ölçümleri ve gama spektroskopisi gibi nükleer fizik araştırmalarına çabucak uyum sağlamıştır. İlerleyen yıllarda ise yüksek çözünürlük gerektiren yüksek enerji fiziği araştırmalarında büyük ün kazanmıştır. Gaz dedektörleri ile birlikte yüksek enerji fiziğinin gelecek nesil dedektörleri olarak bu cihazlar birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır.

Yarıiletkenlerin temel çalışma prensibi gaz iyonlaştırıcı aygıtlardakinin aynısı olmakla birlikte gaz yerine katı yarıiletken malzeme yer almasıdır. Elektrik alan altında iyonlaştırıcı radyasyonun geçişi ile birlikte gaz aygıtlardaki elektron çiftleri yerine elektron-boşluk çiftleri oluşur. Bu oluşan çiftler elektrik alanın etkisiyle toplanırlar. Bu yarıiletken aygıtların elektron-boşluk çiftleri oluşturmak için ihtiyaç duyduğu ortalama enerji, gaz iyonizasyonundaki enerjinin yaklaşık on da biri kadardır. Bu yarıiletken cihazlar için önemli avantajlardan biridir. Bunun pratikteki faydası verilen enerjiye karşılık gelen iyonlaşma enerjisinin daha yüksek çözünürlüklü olmasıdır. Dahası kendi yoğunluklarının fazla oluşu durdurma enerjilerinin gaz dedektörlerine göre çok büyük olmasına sebep olur. Bütün bunlarla birlikte yarıiletken dedektörlerle yürütülen çalışmalarda ortamın sıcaklığının gürültüye ve iyonlaşmaya etkisi fazladır.

Bu çalışmada kullandığımız yarıiletken malzemenin sıcaklığa bağlı davranışını incelemeden önce temel yarıiletken özelliklerini açıklamak önemlidir [1].

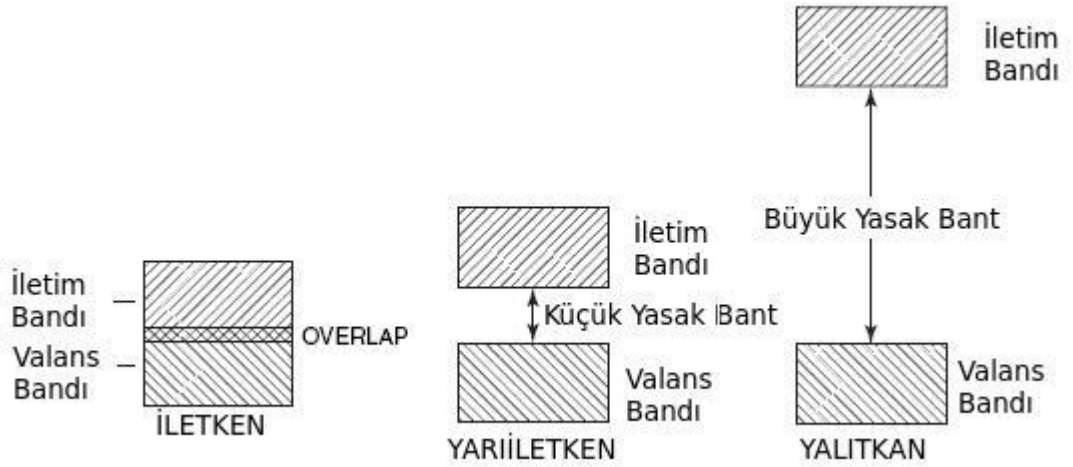
2.1 Temel Yarıiletken Özellikleri

Bu bölümde yarıiletken malzemeleri ve onların elektriksel karakteristiğini tartışacağız. Elektriksel karakteristiğinin tartışılması demek, elektronun malzeme içindeki

davranışının ve bu davranışın dış kuvvet etkisinde nasıl olduğunun anlaşılması demektir. Bu bağlamda elektron hareketinin mükemmel bir periyodik kristalde anlaşılmaya çalışması işimizi kolaylaştırır. Dolayısıyla bu tartışmayı yaparken yapacağımız önemli kabullerden birisi hiç şüphe yok ki saf yarıiletken terimi olacak çünkü gerçekte hiçbir yapısal bozukluğun olmadığı bir saflıktan söz edemeyiz ancak görece bir saflıktan bahsedebiliriz [1].

2.1.1 Enerji Bandı Yapısı

Bilindiği gibi atomlar ayrık enerji seviyelerine sahiptirler. Yarıiletkenler de kristal yapılarıyla bu atomik enerji seviyelerine uyumluluk gösterir. Enerji bant yapısı, enerji seviyelerinin valans bant, yasak bant ve iletim bantı terimleriyle gruplanarak açıklandığı şematik bir gösterimdir. Farklı malzemelerdeki iletkenliği açıklamada oldukça faydalı olan bu şematik gösterim Şekil 2.1'deki gibidir [1].



Şekil 2.1 İletken, yarıiletken ve yalıtkanlarda enerji bandının yapısı

Aslında ayrık enerji seviyeleri birbirlerine öyle yakındırlar ki bir bütünmüş gibi süreklilik arz ederler. Bu yüzden valans bant ve iletim bantı terimleri karşımıza çıkar. Bununla birlikte yasak bant dediğimiz enerji aralığında hiç bir enerji seviyesi yoktur.

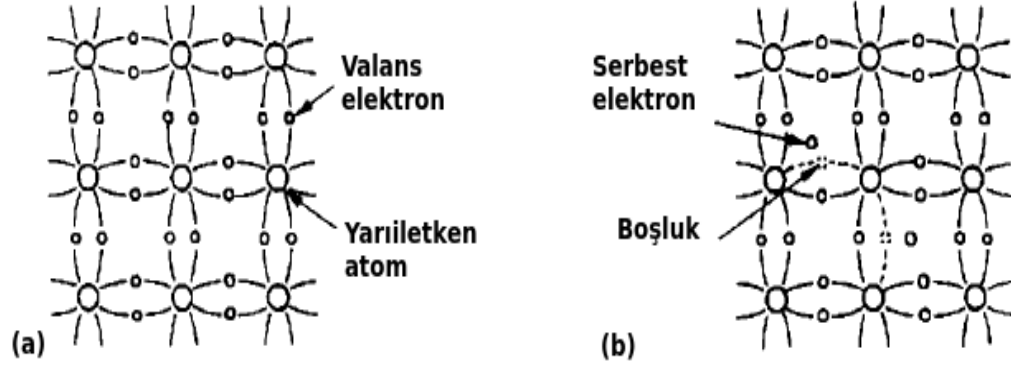
Ancak benzer mantıkla yasak bant hiç bir enerji seviyesinin olmadığı sürekli bir yapıyı anlatır.

En yüksek enerjili bantı iletim bandıdır. Bu bantta ki elektronlar ilişkili oldukları atomlardan ayrılarak bütün kristal yapı içerisinde başı boş bir şekilde serbestçe gezinirler. Valans bandındaki elektronlar ise daha sıkı bir şekilde atomlarına bağlıdır ve kendi atom hücrelerinde kalırlar.

Bantların genişlikleri atomların hücre boşlukları tarafından belirlenirler. Bu parametre sıcaklık ve basınçla değişebilir. Yalıtkanlarda yasak bant çok geniş iken iletkenlerde bu bant bulunmaz. Oda sıcaklığında yalıtkanadaki elektronlar valans bandında olmakla birlikte termal enerjileri yasak bandı atlayacak büyüklükte değildir. Bu yüzden ki elektrik alan uygulandığı vakit, serbestçe kristal etrafında gezinebilen elektronları olmadığından akım oluşmaz. İletkenler için ise durum tam tersidir. Yasak bant olmadığı için oda sıcaklığında ki termal enerjileriyle elektronlar rahatça kristal içinde dolaşabildikleri iletim bandına geçerler. Sonrasında uygulanan elektrik alanla akım oluşur. Yarıiletkenlerde yasak bant ne iletkenlerdeki gibi yok değil ne de yalıtkanlardaki gibi çok büyük kalınlıkta değildir. Öyle ki oda sıcaklığında sadece bir kaç elektron yasak bandı atlayabilecek kadar termal enerjiye sahip olabilir. Elektrik alana olan tepki ise haliyle küçük bir akımla karşılık bulur. Eğer yarıiletkenler soğutulursa elektronların termal enerjileri azalacağı için iletim bandındaki bir kaç elektron valans bandına düşer ve iletkenlik azalır [1].

2.1.2 Yarı İletkenlerde Yük Taşıyıcılar

Bilindiği üzere mutlak sıfır, termodinamik açıdan bir sistemin düzensizliğinin ölçüsü olan entropi'nin sıfır olduğu duruma işaret eder. Bu bakış açısıyla mutlak sıfırda yarıiletkenlerde valans bandındaki elektronların yasak bandı atlayacak durumları olamaz çünkü bu durumda ki elektronların düzensizliğe olan eğilimlerinden söz edemeyiz.



Şekil 2.2 Silisyumda ki kovalent bağ: (a) 0°K de bütün elektronlar kovalent bağa katılır, (b) yüksek sıcaklıklarda bazı elektronlar kovalent bağlarını kırıp balans bandından ayrılırlar

Şekil 2.2.a'da görüldüğü gibi valans bandındaki elektronların hepsi atom hücrelerine sıkı sıkıya kovalent bağ ile bağlıdır. Si ve Ge yarıiletken elementler olup +4 değerliklidirler. Bu elementlerin atomları bütün elektronları kovalent bağ yaparlar dolayısıyla elektronlarının hepsi valans bandındadır. Oda sıcaklığında ise yarıiletken içinde termal enerjisiyle bir elektron yasak bandı atarsa iletim bandında serbestçe hareket ederek yük taşıyıcı işlevini yerine getirir. Aynı zamanda termal enerjisiyle iletim bandına geçen elektronun valans bandında bıraktığı boşluğa komşu atom hücresinden bir elektron geçtiğinde tekrarlayan bu hareket sonucunda valans bandında göreceli hareket eden bir boşluk görülür. Şekil 2.2.b'de görülen bu boşluk tıpkı elektron havuzunda hareket eden artı yük gibi iletkenliğe katkıda bulunur. Anlaşılacağı üzere

yarıiletkenlerde iletim bandında hareket edebilen elektronların yanı sıra valans bandında hareket eden artı yükler elektrik akımına katkıda bulunurlar. Burada eşit derecede önemli iki farklı yük taşıyıcısından bahsetmekteyiz. Bu sadece elektronların iletim bandını dolaşarak akım oluşumunu sağladığı iletkenlerdeki mekanizmadan oldukça farklıdır [1].

2.1.3 Esas Yük Taşıyıcı Yoğunluğu

Bir önceki bölümde termal enerjilerinden dolayı yarıiletken içerisinde elektron ve boşluk çiftlerinin oluştuğunu söyledik. Bu anlatılana paralel bir mantıkla tersininde mümkün olacağı söylemek yanlış olamaz. Çünkü termal enerjisini kaybeden iletim bandındaki elektron valans bandındaki boşluğa düşebilir. Ayrıca denge durumunda bu iki sürecin birbirlerini dengeleyecek oranda gerçekleştiğini söyleyebiliriz aksi halde iletim bandındaki elektron yoğunluğu ile valans bandındaki boşluk yoğunluğu sürekli olarak artar. Bu olayın bütününe bakarsak aynen sıcaklıkla yer kabuğundan yukarıya doğru hareket eden gaz molekülünün davranışını görürüz. Hatırlanacağı üzere atmosferde yukarılara çıkıldıkça üstel olarak azalan birim alandaki molekül sayısı Boltzmann dağılımına uymaktadır. Bu sebeple belirli bir yasak enerji aralığını atlaması gereken birim alandaki yük taşıyıcı sayısı aşağıdaki gibi verilir.

$$n_i = \sqrt{N_c N_v} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) = AT^{3/2} \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \quad (2.1)$$

Burada N_c iletim bandında ki durum sayısı, N_v valans bandında ki durum sayısı, k Boltzmann sabiti ve E_g ise 0^0 K'de ki yasak bant enerjisidir. N_c ve N_v Fermi-Dirac istatistiği ile hesaplanabilir ve her biri $T^{3/2}$ ile değişir şekilde gösterilebilir. Denklemin sağ tarafında kalan A sıcaklıktan bağımsız bir sabittir [1].

2.1.4 Hareketlilik (Mobility)

Elektrik alana maruz kalan yarıiletken malzemenin içinde hareket eden esas yük taşıyıcılarının sürüklenme hızları

$$v_h = \mu_h E \quad (2.2)$$

$$v_e = \mu_e E$$

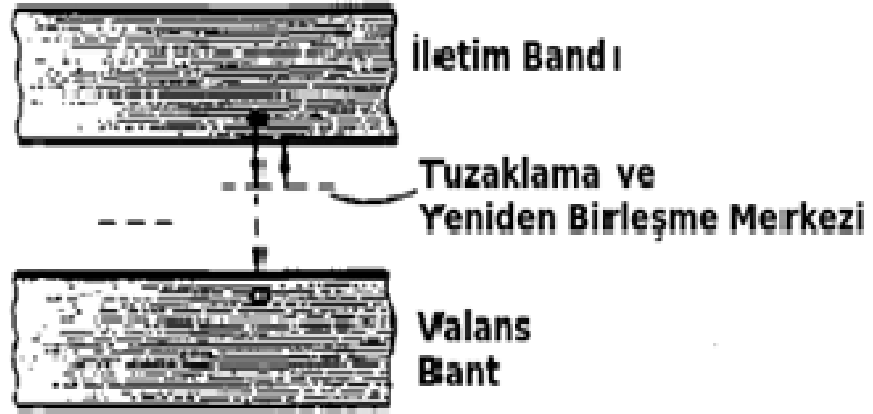
şeklinde verilir ve E uygulanan elektrik alan büyüklüğünü, μ_e elektron hareketliliğini, μ_h ise boşluk hareketliliğini temsil eder. Hareketlilik ele alınan malzeme için uygulanan elektrik alana ve sıcaklığa bağlıdır [1].

2.1.5 Elektron-boşluk Birleşmesi

Elektron, valans bandındaki müsait boşluğa iletim bandından foton ışıması yaparak düşebilir. Bu süreç doğrudan elektron-boşluk birleşmesi (recombination) olarak bilinir ve tam olarak elektron-boşluk oluşum sürecinin tersidir. Burada hatırlanması gereken önemli unsur enerji momentum korunumundan dolayı birleşecek olan elektron ve boşluğun tam olarak belirli değerlerde, enerjide olması gerektiğidir. Teorik hesaplamalar bize der ki eğer sadece bahsi geçen süreç yarıiletken içinde gerçekleşiyorsa bu yük taşıyıcıların yaşam ömürleri saniye mertebesinden olması gerekir. Ancak deneysel sonuçlar göstermiştir ki yük taşıyıcıların yaşam süreleri nano saniyeden yüz mikro saniyelere değişebilmektedir. Buradan yola çıkarak gerçekleşmesi muhtemel başka süreçlerin var olduğunu söyleyebiliriz.

Elektron-boşluk birleşmesine etki eden önemli bir unsur da kristal içindeki yapısal safsızlıktır. Safsızlık faktörü Şekil 2.3'de gösterildiği üzere yasak bant aralığına harici enerji seviyeleri ekleyerek enerji bant yapısını değiştirir. Yasak bantta oluşan bu yeni seviye elektron-boşluk-birleşme merkezleri olarak adlandırılır. Temelde bu merkezlerin iki işlevi vardır. Bunlardan birincisi iletim bandından elektron yakalayıp bu elektronu

bir süre tuttuktan sonra tekrar iletim bandına göndermek, ikincisi ise iletim bandından yakaladığı elektronun valans bandından yakaladığı boşlukla birleşmesini sağlamaktır. Elektron-boşluk birleşme merkezlerinin işlevini yerine getirmesi için sürecin sadece iletim bandından yakalanan elektronla başlaması gerekmez benzer şekilde olay valans bandından boşluk yakalanmasıyla da başlayabilir.



Şekil 2.3 Yasak bantta tuzaklama ve yeniden birleşme sınırları

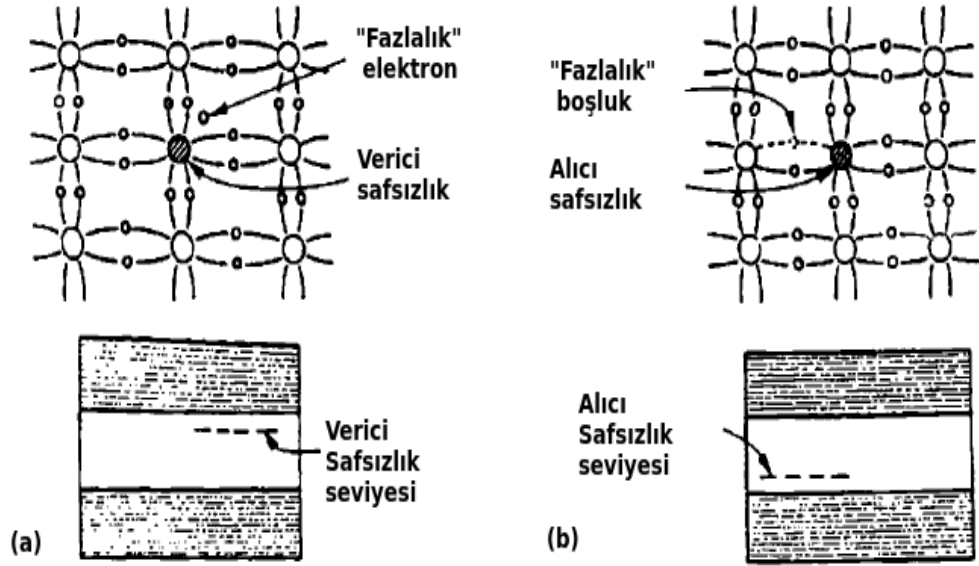
Materyaldeki safsızlıktan kaynaklı diğer bir etki tuzaklamadır. Bu tip etkiye sahip tedirgin edilmiş enerji seviyeleri sadece tek tip yük taşıyıcılarını yakalar. Bu tip enerji seviyeleri yakaladığı yük taşıyıcısını kesin ve karakteristik sürelerce alıkoyar. Eğer bu tuzaklama zamanı yük toplama zamanının katı ile ifade ediliyorsa açıktır ki tamamlanamayan yük toplama işlemi sonucunda yükler kaybedilir. Eğer tuzaklama zamanı çok küçükse hiç bir etki gözlenmez. Bunların dışında elektron-boşluk birleşme merkezleri daha öncede gördüğümüz üzere aynı zamanda tuzaklama merkezleridir.

Safsızlık tuzaklamanın ve elektron-boşluk birleşmesinin kaynağı olmakla birlikte aynı zamanda yapısal hücre bozuklukları da yasak bant aralığında benzer enerji seviyelerine

sebepler olur. Bu tür bozukluklar radyasyon bombardımanı, ısı şoku veya malzemenin üzerinde biriken stresle sonradan meydana gelebilir [1].

2.2 Katkılı Yarıiletkenler

Saf yarıiletkenlerde iletim bandında ki elektron sayısı ile valans bandında ki boşluk sayısı birbirine neredeyse eşittir. Bu denge malzeme içerisinde safsızlık oluşturularak istenilen yönde artırılabilir veya azaltılabilir. Silisyum ve germanyum çevresindeki atomlara genellikle dörtlü kovalent bağ yapmasıyla bilinirken bunun yanı sıra üçlü ve beşli bağlarda da bulunabilir. Bu safsızlık katkı (doped) adı verilen ikincil yarıiletkenler meydana getirmek için kristal örgü içerisine dahil edilir.



Şekil 2.4 (a) n-tip yarıiletken elde etmek için verici safsızlık eklenir. Verici safsızlık fazlalık elektronuyla kristal yapıyı bozar ve yasak bant da verici safsızlık seviyesi meydana getirir. (b) p-tip yarıiletken elde etmek için alıcı safsızlık eklenir. Alıcı safsızlık fazlalık boşluğuyla kristal yapıyı bozarak yasak bantda verici safsızlık seviyesi meydana getirir

Eğer katkı Şekil 2.4.a'da ki gibi beşli bağ yapıyorsa temel seviyedeki atomların hepsi kendi valans bandındaki yerlerini alırlar ancak yapı içerisinde katkının kendi doğasından kaynaklı ortama göre fazlalık gibi görünen elektron kendine valans bandında yerleşecek seviye bulamaz. Bu elektron safsızlık atomlarınca oluşturulan yasak bant içerisinde iletim bandına yakın bir seviyeye otururlar.

Daha önceki bölümlerde bahsi geçen elektron-boşluk birleşme merkezlerine ve tuzaklama seviyelerine nazaran bu seviye iletim bandına çok yakındır öyle ki elektron kolayca iletim bandına geçer ve yarıiletkenin iletkenliğinin artmasını sağlar. Bunlara ek olarak yarıiletken malzemeye yapılan bu katkıyla harici elektronlar valans bandında rastgele oluşan boşlukları da doldururlar dolayısıyla valans bandındaki boşluk yoğunluğu azalır. Daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi yarı iletkenlerde iletkenliğe aynı miktarda katkıda bulunan elektron ve boşluklar katkılama işleminden sonra yoğunlukları değişmesiyle artık aynı katkıyı sağlamazlar. Bizim ele aldığımız bu durum için çoğunluk yük taşıyıcıları elektronlar olurken azınlık yük taşıyıcıları boşluklar olur.

Eğer katkı Şekil 2.4.b de ki gibi üçlü bağ yapıyorsa temel seviyedeki atomların hepsi valans bandında yer bulur ancak yasak bant içinde elektron eksikliğinden kaynaklı olarak oluşan valans bantında yakın enerji seviyesi boş kalır. Bu oluşan enerji seviyesi valans bantında öyle yakındır ki valans bandındaki elektronlar kolayca bu seviyeyi atlarlar. Böylelikle valans bandında fazlaca boşluk görmemiz mümkün olur. Böylece yarıiletken malzemedeki boşluklar çoğunluk yük taşıyıcıları haline gelirken elektronlar azınlık yük taşıyıcıları olurlar.

Katkılanan malzeme yarıiletkeninde ki etkisine göre p tipi veya n tipi adını alır. P tipi katkı yarı iletkeninde boşluk çoğunluk taşıyıcılarını meydana getirirken N tipi katkı elektron çoğunluk taşıyıcılarını meydana getirir. Katkı miktarı çoğunlukla cm^2 ye 10^{13} ile orantılıyken katkılandığı malzeme Ge veya Si yoğunluğu cm^2 ye 10^{22} kadardır yani yaklaşık olarak milyon tane yarıiletken malzemeye bir safsızlık katkısı düşmektedir.

Ancak katkının miktarı iletkenliği arttırmak için yükseltile bilinir ve buna yoğun katkılama denir.

Termal dengede katkılanan malzemenin tipinden bağımsız olarak elektron ve boşluk yoğunlukları kütleli etkileşim yasasına (the law of mass action) itaat eder ve bunların çarpımları aşağıdaki şekilde verilir.

$$np = n_i^2 = AT^3 \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right) \quad (2.3)$$

Burada n elektron yoğunluğu, p boşluk yoğunluğu, n daha önceki bölümlerde anlatılan esas yük taşıyıcılarının yoğunluklarıdır. Yarıiletken nötr bir yapı olduğu için pozitif ve negatif yük yoğunlukları, miktarları eşit olmalıdır. Bu yüzden n tipi yarıiletken yapan katkı miktarı N_D olduğu durum için n konsantrasyonun tamamı N_D kabul edilir çünkü N_D miktarı n_i den çok çok büyüktür.

$$n = N_D \quad (2.4)$$

Bu sebeple n tipi için azınlık taşıyıcıları olan p

$$p \cong \frac{n_i^2}{N_D} \quad (2.5)$$

ile verilir. Benzer yaklaşım p tipi yarıiletken içinde geçerlidir [1].

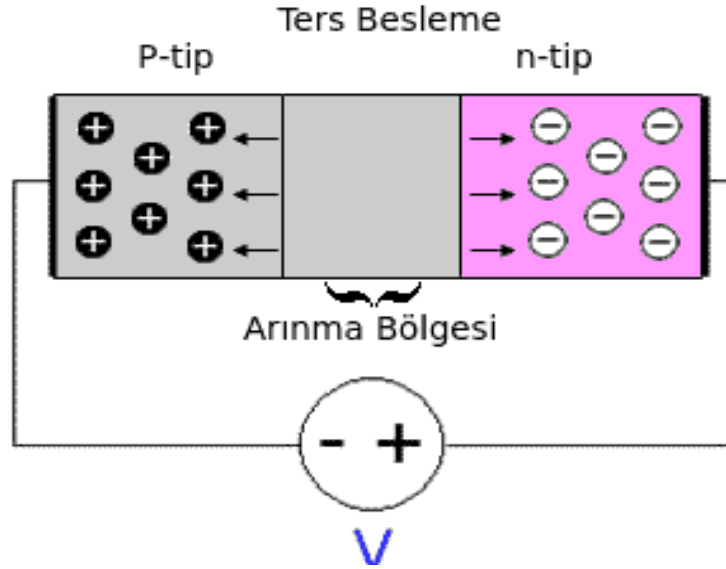
2.3 PN Eklemler ve Arınma Bölgesi

Günümüzde kullanılan yarıiletken detektörler işlevleri yarıiletken eklemlerin düzenlenmesine bağlıdır. Elektronikte doğrultucu olarak kullanılan pn eklemler oldukça tanınmaktadır. Bunlar dedektör olarak kullanılma şekilleri değildir. Bu eklemler özel bir teknikle birleştirilirler öyle ki p tipi yarıiletken ile n tipi yarıiletken bir birlerinin atomlarına bağlanır.

İki eklem arasındaki bu yakın birleşme eklemlendikleri yerden p ve n tip yarıiletkenlerin içine doğru genişleyen bir arınma bölgesi meydana getirir. Bu arınma bölgesi farklı tip yük taşıyıcılarının kendi yoğunluklarının az olduğu karşı tarafa nüfuz etmesiyle oluşur. Bu süreç doğal olarak gerçekleşir çünkü n tip yarıiletkende çoğunluk taşıyıcıları olan elektronlar iletim bandında hareket etmek suretiyle karşıdaki az yoğunluklu alana yerleşirler tıpkı odanın içine sıkılan parfümün bir anda odaya yayılması gibi. Benzer şekilde valans bandındaki boşluklarda aynı süreci yaşar. Burada dikkat edilmesi gereken nokta bu karşı tarafa nüfuz etme durumunun koşullarıdır. Zira buldukları belirli tip yarıiletkenin karşı tarafa geçen sırasıyla elektron veya boşluklar arkalarında hareket edemeyen yine sırasıyla pozitif ve negatif alanlar bırakır. Bu alanlar karşı taraftan gelen pozitif (boşluk) ve negatif (elektron) yüklere karşı koyarlar ve sonuç olarak belirli bir mesafe sonra bu nüfuz etme süreci durur. Eklemlenme işlemiyle karşılıklı taraflarda oluşan hareketsiz pozitif ve negatif yükler doğal olarak elektrik alan meydana getirirler. Ortaya çıkan elektrik alanla enerji bandı diyagramı aşağıdaki şekilde değişir. Dolayısıyla arınma bölgesi adı verilen bu alan elektrik alanla aynı yönde olan elektronları çabucak temizler. Bu yüzden bu bölgede oluşan, doğan, bir şekilde malzemeye nüfuz eden elektronlar burada duramaz, sürüklenirler. İşte bu prensip bize parçacık fiziğinde pn eklemlerinin kullanılması imkânını sağlar [1].

2.4 Ters Beslemeli Pn Eklemler

Pn eklem malzemelerin normal beslemeyle detektör olarak kullanılmasının belirli zorlukları vardır. Örneğin parçacık enerjisi elektron-boşluk oluşturmak için yeterli olsa bile oluşan taşıyıcıların enerjisi eklem yapıdan kaynaklı potansiyeli yenecek kadar büyük olmayabilir. Bunun dışında kısa arınma bölgesi kondansatör gibi davranıp sinyal ölçümünü etkileyip gürültüyü arttırabilir. Oysa ters besleme ile daha iyi sonuçlar almak mümkündür. Ters besleme Şekil 2.5 deki gibi pn eklem p tip tarafına negatif n tip tarafına pozitif voltaj uygulanmasıdır. Bu voltaj uygulandıkları kısımlardaki çoğunluk taşıyıcıları kendine doğru çekerek arınma bölgesinin genişlemesini sağlar. Daha yüksek ters besleme uygulandıkça daha geniş arınma bölgesi elde edilir. Hatta aynı şekilde voltaj arttırımı yük toplamının verimliliğini arttırır. Ancak bu voltajın çıkabileceği yarıiletkenin direncinden kaynaklı bir limit değeri vardır. Eğer bu değer aşırsa yarıiletken yapısı bozulur, kırılır ve iletken hale gelir.



Şekil 2.5 Ters beslemeli pn eklem

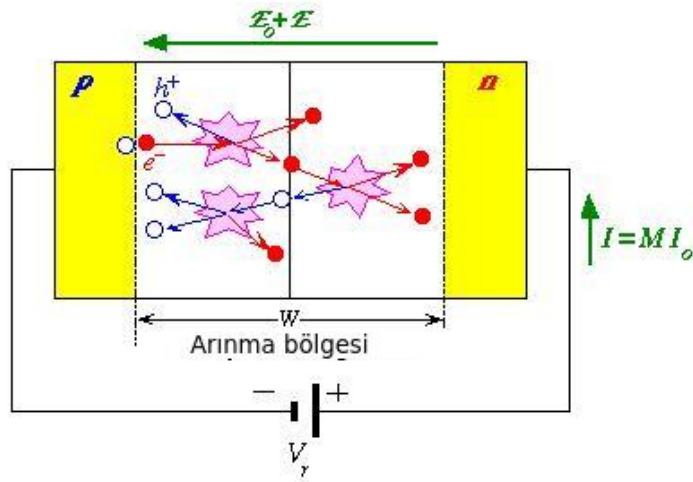
Ters beslemeyle arınma bölgesi genişliği hesaplanabilir dolayısıyla V_0 potansiyeli $V_0 + V_B$ ile yer değiştirir. Burada V_B bias voltajıdır. Genelde $V_0 \ll V_B$ olduğundan V_0 hesaplamalarda ihmal edilir [1].

2.5 Çığ Çoğalması

Çığ çoğalması (avalanche multiplication), çarpma iyonlaşması (impact ionization) yani enerjistik elektronların kendi temel seviyeleri dışında diğer valans bandındaki elektronlara çarpması suretiyle yeni yük taşıyıcıları oluşturması işleminin yüksek elektrik alan altında domino etkisi yaratarak tekrarlanması şeklinde açıklana bilinir. Öyle ki Şekil 2.6 da gösterildiği gibi W kalınlıklı arınma bölgesine has I_0 akımı M (çarpım faktörü) kadar katlanarak büyür ve

$$M = I / I_0 \quad (2.6)$$

şeklinde verilir.

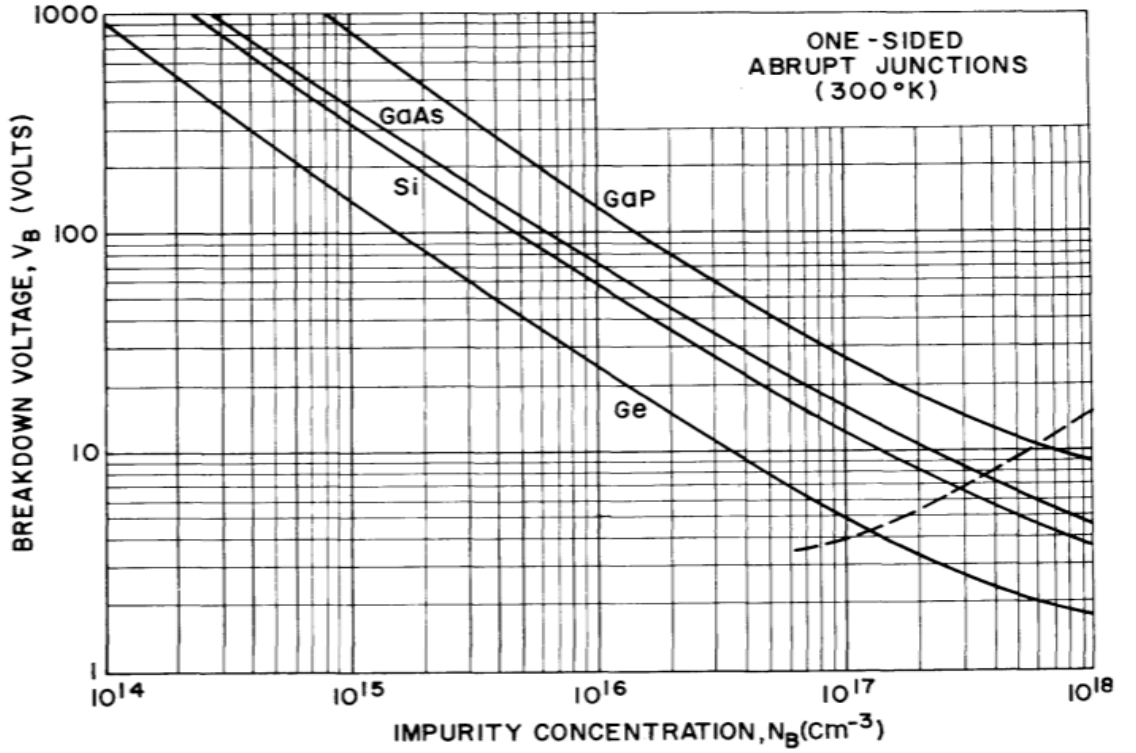


Şekil 2.6 Ters beslemeli pn eklem de çığ çoğalması [2]

Çiğ çoğalmasının diğere önemli parametresi kırılma voltajıdır (V_B). Kırılma voltajı bulunurken yapılan hesaplamalarda M çarpım faktörünün sonsuza yaklaştığı kabul edilir. Bu teorik hesaplamalar pn eklemli yarıiletkenler üzerinde yapılan testlerce de doğrulanmış ve yaklaşık olarak aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$V_B \cong 60(E_g/1.1)^{3/2}(N_b/10^{16})^{-3/4} \quad (2.7)$$

Burada E_g eklem yapının yasak bandının elektron volt cinsinden değeri, N_b ise cm^3 e düşen arka plan katkılama miktarıdır. Kırılma voltajının katkılama miktarına göre grafiğı Şekil 2.7 de görölmektedir.

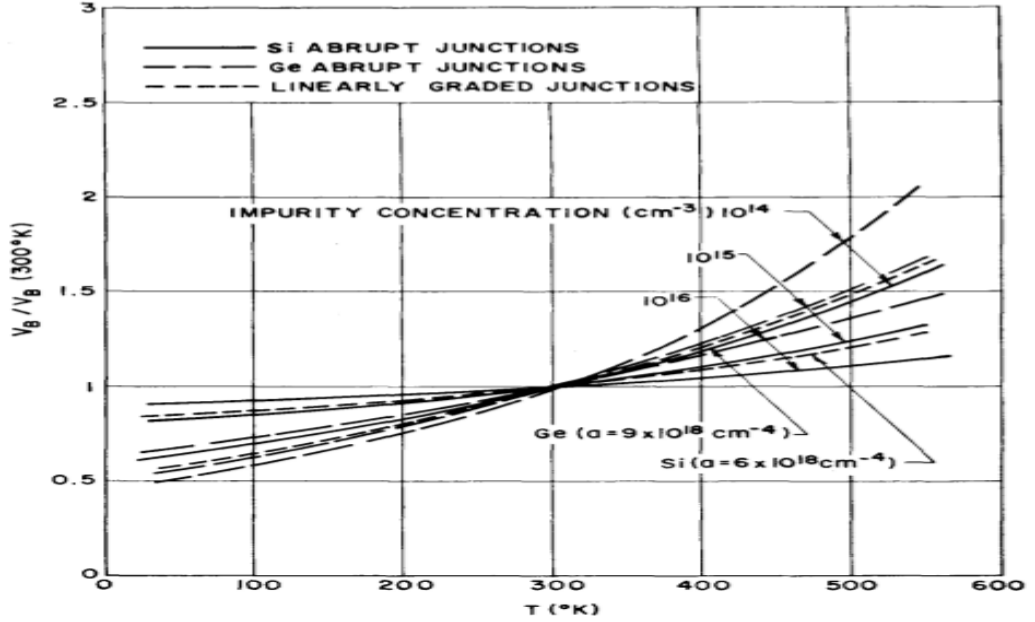


Şekil 2.7 GaAs, GaP, Si, Ge’de tek taraflı ani pn eklem için safsızlık konsantrasyonuna karşılık kırılma voltajı grafiğı. Kesikli çizgi, sonrasında tünel etkisinin kırılma mekanizmasına hükmettiğı maksimum katkılamaya işaret eder [3]

Deneysel hesaplamalar kırılma voltajının oda sıcaklığındaki katkıma miktarına göre değişimini net bir şekilde göstermektedir. Ancak farklı sıcaklıklarda kırılma voltajının da değiştiğini bilmekteyiz [3].

2.6 Kırılma Voltajının Bağlılığı

Yüksek sıcaklıklarda kırılma voltajı artmaktadır. Bu artış için en basit açıklama şu olur ki: Yüksek elektrik alan altında arınma bölgesinden geçen sıcak taşıyıcılar enerjilerinin bir kısmını her bir elektron-fonon için ortalama serbest yolu dolaştıktan sonra optik-fononlara aktarır. Optik-fononların lamda değeri sıcaklık artışıyla düşer. Bu yüzden taşıyıcılar sabit elektrik alan altında verilen mesafe boyunca kristal hücrelerine enerjilerini kaybeder. Nitekim taşıyıcılar elektron-boşluk çifti yaratmak için yeterli enerjiyi elde etmeden önce daha yüksek potansiyel farktan geçmelidirler. Detaylı hesaplamalar Baraff Teoremi'nin modifikasyonu ile yapılır. Şekil 2.8'de kırılma voltajının sıcaklığa bağlı değişim grafiği gösterilmiştir [3].

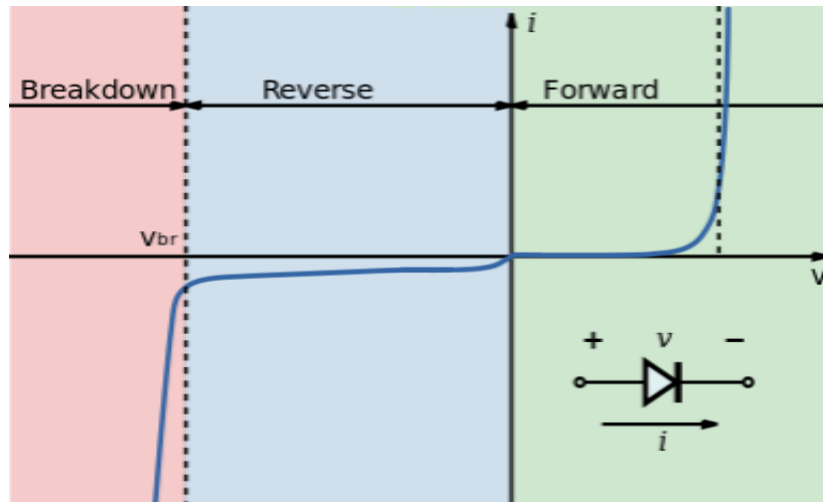


Şekil 2.8 pn eklemlerde kırılma voltajının sıcaklıkla değişimi [3]

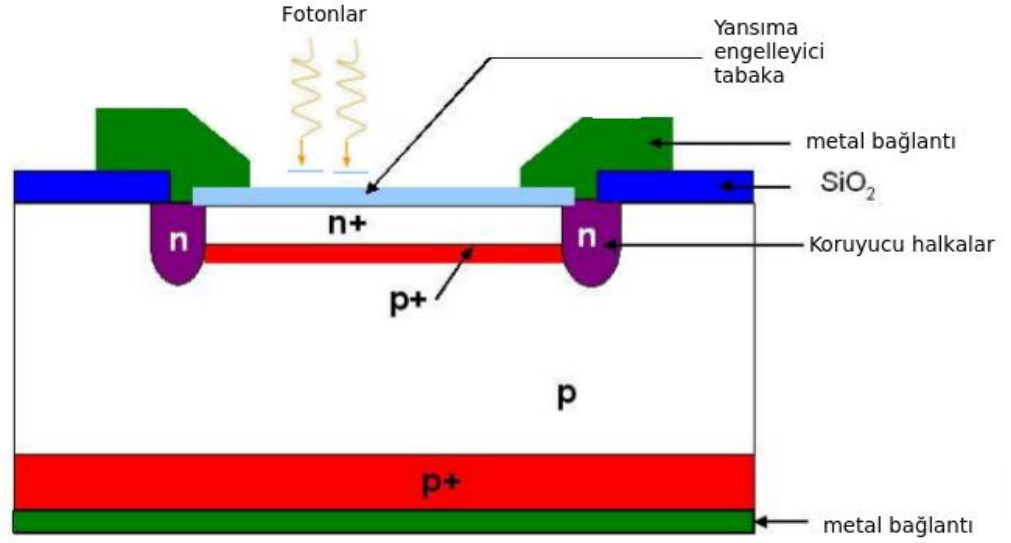
2.7 ığ Fotodiyotlar

ığ foto diyotlar (Avalanche Photo Diode, APD) yüksek ters voltaj beslemeli pn eklemler olup yüksek verimlilikle foton yakalamak maksadıyla üretilirler. Son yıllarda bu teknolojinin giderek yaygınlaşması ve hızlıca diğer foto diyotların önüne geçmeye başlamaların temel sebebi bu foto diyotların çığ mekanizmasıyla çok büyük kazançlar elde etmesidir. Aynı zamanda bu çığ mekanizması 100 GHz gibi çok yüksek frekansta çalışabilmektedir. Bu da bizim foton yakalama sıklığımızı arttıran bir faktördür.

Pn eklem yarıiletken diyotların voltaj akım Şekil 2.9’da gösterildiği gibidir. Bu voltaj akım karakteriştiği diyotlar için standarttır. Bununla birlikte çığ fotodiyotlar grafiğimizin sol tarafında yani kırılma voltajının olduğu bölgede çalışır. Hiç Şüphe yok ki bu bölgede çalışmasının sebebi foton ile etkileşime giren elektronun oluşturduğu has akımı, fotoelektronu, çok yüksek oranda katlayıp yüksek kazanç elde edilmesini sağlamaktır. Temelde üç adet kırılma mekanizması vardır. Bunlar termal düzensizlik, tünel efekt ve çığ çoğalmasıdır. Bu mekanizmalardan çığ çoğalması çığ fotodiyotlar için isminden de anlaşıldığı üzere has akım kazancına katkısının büyük olması sebebiyle en önemlisidir.



Şekil 2.9 Pn eklem diyotların voltaj karakteri



Şekil 2.10 Çiğ fotodiyotlarının (APD) temel yapısı [4]

Çiğ çoğalmasında akımı katlayan M faktörü çiğ fotodiyotları için fotoelektron çarpım faktörü olarak tanımlanır. Bu faktör katlanmış fotoakımın I_{ph} , fotoakıma I_{pho} 'ya bölümüyle verilir [3].

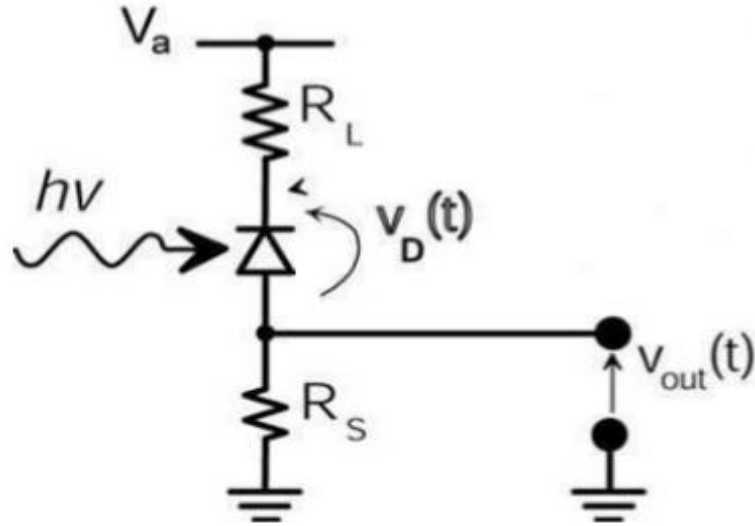
$$M_{ph} \equiv \frac{I_{ph}}{I_{pho}} = \frac{1}{1 - \left(\frac{V}{V_B}\right)^n} \quad (2.8)$$

Burada V_B kırılma voltajı, V uygulanan voltaj ve n yarıiletken malzemenin katkı profiline, ışın dalga boyuna bağlı bir sabittir. Aslında kazancın bir ifadesi olan bu formül temelde kırılma voltajının kazanca etkisini de gözler önüne sermektedir. Dolayısıyla ortamın sıcaklığının kırılma voltajına olan etkisi hatırlanırsa sıcaklığın kazanca etkisi çok açıktır. Hatta deneysel olarak herhangi bir karakteristik belirlemeden önce besleme voltajının sabit olduğu durum için sıcaklığın artışıyla çiğ fotodiyot kazancının azalacağını beklemek mantıklı olur.

2.8 Çığ Fotodiyotlarda Sinyal Sönümü

Çığ fotodiyotlarda fotondan elde ettiğimiz fotoakım katlandıktan sonra tespiti mümkün olmaktadır. Ancak elbette ki elimizdeki pn eklem yapının sürekliliğini sağlamamız gerekmektedir. Çünkü arka arkaya gelen fotonların bütün pn eklemimizin yapısını komple bozma durumu vardır. Dolayısıyla çeşitli APD`lerde kullanılan çeşitli sinyal sönümleme mekanizmaları vardır. Bunlar aktif ve pasif sönümleme mekanizmaları olarak ikiye ayrılırlar [4].

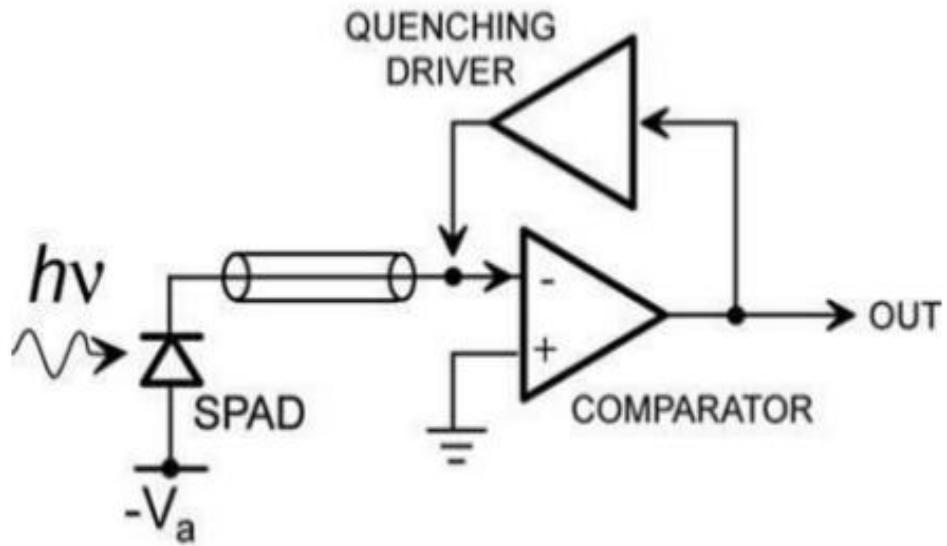
Pasif sönümleme: Çığ fotodiyotlara direnç bağlanması suretiyle gerçekleştirilen sinyal sönümleme yöntemidir. Şekil 2.11`de gösterilen devreyle Normalde diyot iletimde değilken besleme voltajı U_{bias} , kırılma voltajında eşit ya da büyüktür. Ancak diyotumuzda çığ çoğalmasının görüleceği kırılma yaşanır bu direnç çığ fotodiyota uygulanan voltajı düşürür. Böylelikle diyotun içindeki elektrik alan azalmış olur ve sonuç olarak çığ fotodiyot fotona maruz kalmadan önceki haline geri döner.



Şekil 2.11 Pasif sinyal sönümleme [4]

Aktif Sönümlenme: Çığ fotodiyotlara direnç yerine elektronik devre bağlanması suretiyle gerçekleştirilen sinyal sönümlenme yöntemidir. Bu devre diyotta kırılmanın gerçekleştiğini tespit ettiği an besleme voltajını düşürür ve böylelikle sinyal söndürülmüş olur. Şekil 2.12 bu metoda örnek bir devreyi gösterir.

Bu metot Silikon fotoçoğaltıcılar'da (Silicon Photo Multiplier, SiPM) her bir piksele uygulanması pahalı olduğundan kullanılmaz [4].

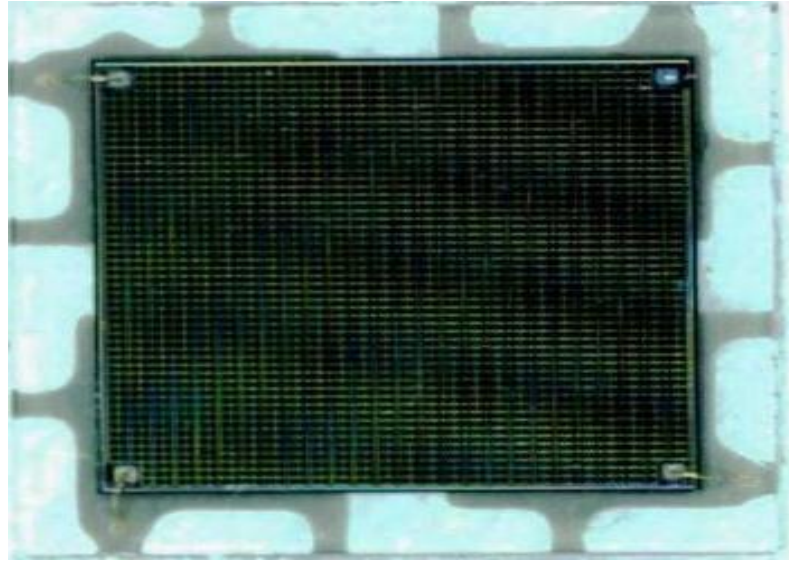


Şekil 2.12 Aktif sinyal sönümlenme [4]

3. SİLİKON FOTOÇOĞALTICILAR

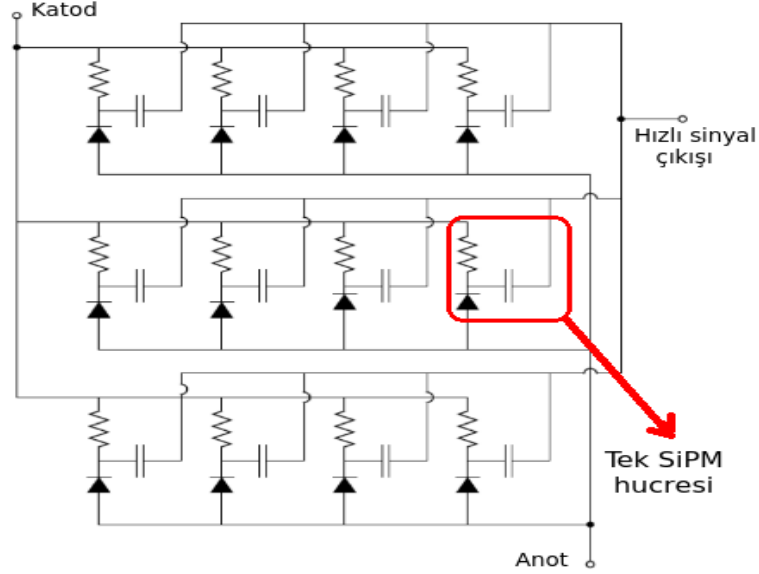
Yüksek enerji fiziğinde ve astrofizikte yapılan ve yapılması planlanan deneylerde çok sayıda foton dedektörlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Örneğin; Çok yüksek enerjili nötrinoları tespit etmeyi amaçlayan TAUWER Projesi 2000 civarında fotoçoğaltıcı kullanmayı planlamaktadır. Ayrıca kullanılacak her bir fotoçoğaltıcı ölçümün hassasiyetine etki edeceğinden dolayı her birisi için az sayıda foton tespit edebilme kabiliyeti önemlidir.

SiPM'ler TAUWER deneyinin ihtiyaçları doğrultusunda sıcaklığa karşı düşük hassasiyetleri ve besleme voltajındaki düşük dalgalanmaları, radyasyona karşı dirençleri, dayanıklı ve kompakt yapıları, küçük olmaları, ucuz olmaları, yıllar boyunca çalışabilmeleri ve manyetik alandan etkilenmemeleri gibi özellikleriyle öne çıkarlar.



Şekil 3.1 Silikon fotoçoğaltıcı [5]

SiPM'lerde pasif sinyal sönümlenme yöntemiyle kullanılan birçok çığ fotodiyotun paralel bağlanmasıyla meydana getirilen fotoçoğaltıcılardır. Yapısındaki her bir çığ fotodiyot ve ona bağlı olan direnç piksel yada hücre olarak adlandırılır. Bu durum Şekil 3.2'de net görülmektedir.



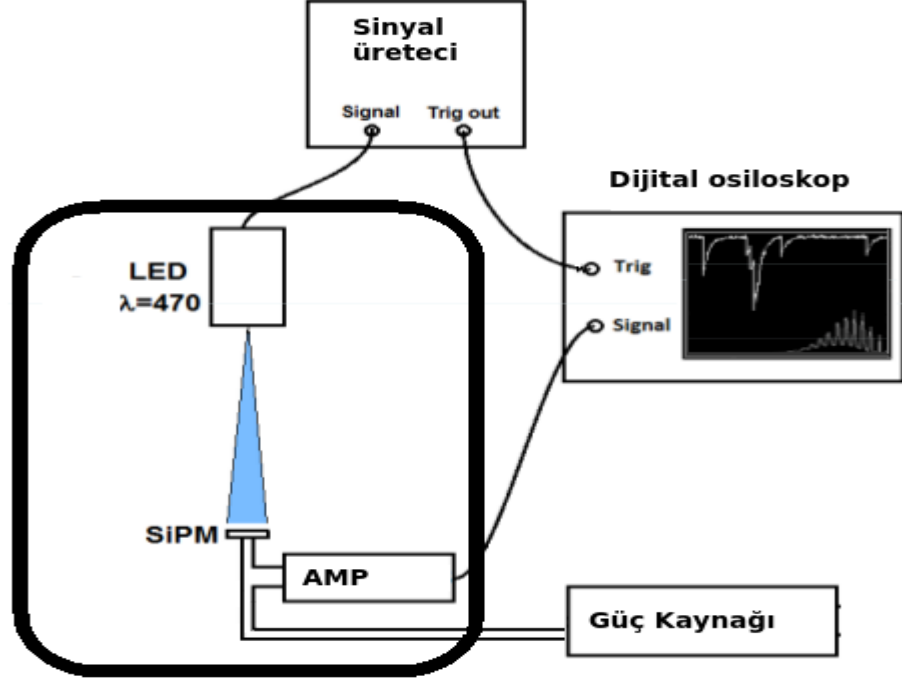
Şekil 3.2 SiPM iç yapısının şematik çizimi

Genel görüntüsü Şekil 3.1 ile verilen, piksellerden oluşan SiPM yapısı gereği ayırt edilebilir bir sinyal karakterine sahiptir. Çünkü pikseller ya var ya yok prensibiyle dijital bir şekilde çalışırken her bir pikselden gelen sinyal aynı kanala bağlanmasından ötürü elde edilen toplam sinyal analog bir yapıdadır. Bu bağlamda SiPM'ler yarı dijital yarı analog cihazlardır.

3.1 SiPM Karakteristiği

Genel hatlarıyla SiPM karakteristiğinin açıklanacağı bu bölümde, SiPM sinyali, gürültüsü, foton yakalama verimliliği ve kazancı işlenecektir. Bu amaçla hazırlanan düzenek ışık sızdırmayan bir kutu içerisine yerleştirilen SiPM, SiPM ile bütünleşen sinyal yükseltici ve SiPM'i aydınlatan, sinyal üretici ile kontrol edilen Led'den oluşur.

Düzenek Led ışığının açık ve kapalı olduğu durumlarda SiPM sinyal çıkış bilgisini osiloskop yardımıyla okur ve kayıt altına alır.



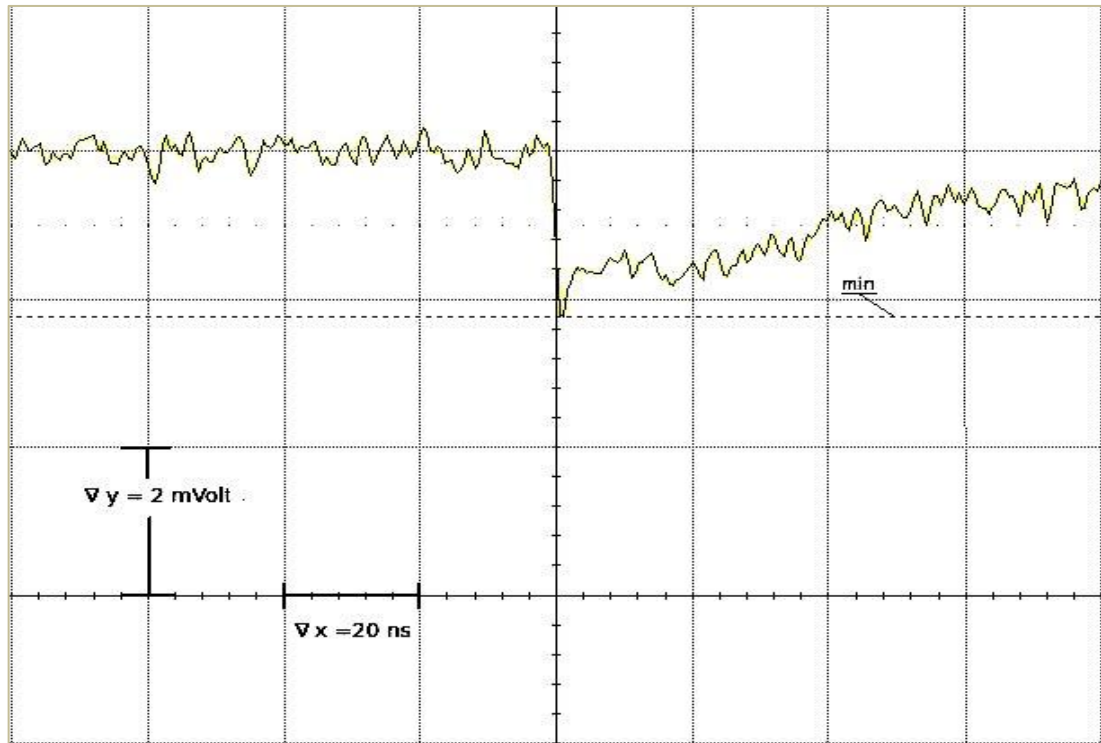
Şekil 3.3 Işıklı ve ışısız SiPM sinyali ölçen düzenek

Şekil 3.3'de şematik yapısı görülen deney sistemiyle SiPM detektörünün TAUWER projesi kapsamında kullanılacak Kuraray organik parıldayıcısı taklit edilmiştir. Burada mavi ışık yaydığı bilinen Kuraray organik parıldayıcı karo, mavi bölgede ışık yayan Led ile taklit edilmiştir.

3.1.1 Sinyal Çıkışı

Kurulan deney düzeneğinde sinyal üretcinin sağladığı dar genişlikteki tekli sinyallerle çalışan düşük şiddetli Led ışığı SiPM üzerine düşürülür. Bu sayede etkin SiPM bölgesindeki her bir piksele foton çarpmasıyla belirli bir verimlilikle genliği SiPM kazancına bağlı sinyaller üretilir.

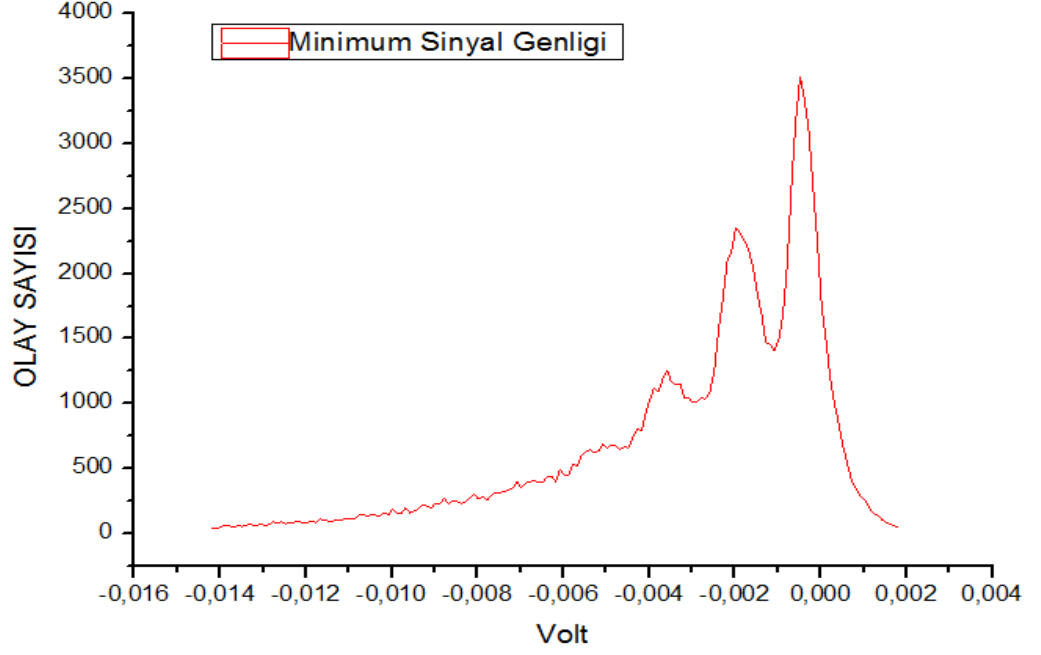
Oluşan, Şekil 3.4 ile gösterilen örnek sinyal incelendiğinde açılan 160 ns lik kapı içindeki voltaj değerinin yaklaşık olarak 80. ns de çok ani bir şekilde düştüğü görülür. Bu fotoelektronla başlayan, pn eklem kırılmasının yaşandığı sürecin başlangıcıdır. Hemen sonrasında ise tetiklenmiş SiPM pikseline ait pasif sinyal sönümlenme devresinin pencerede gözlenen voltajı yavaşça eski değerine taşıdığı görülmektedir. Ayrıca voltaj değerini değiştiren yarıiletken kırılma teknolojisinin, sönümlenme yapan klasik devre teknolojisine oranla çok daha hızlı çalıştığı da görülür.



Şekil 3.4 Sensel30035FM model SiPM sinyal görüntüsü

Düşük Led ışığına maruz kalan SiPM piksellerinden gelen yüklerin oluşturduğu değerlerden elde edilen, Şekil 3.5'de gösterilen histogramda Gaussian dağılımlar görülmektedir. Tetiklenen piksel sayısı birbirinden farklı Gaussian dağılımlarının oluşmasına neden olmaktadır. Birbirini takip eden Gaussian dağılımları kendilerini

meydana getiren tetiklenmiş piksel sayıları bakımından birbirlerinden ya bir eksik ya bir fazladır.



Şekil 3.5 Led ışığı açırken elde edilen sinyallerin minimum değerlerinin histogramı

3.1.2 SiPM Kazancı

Diğer hiç bir fotoçoğaltıcıda olmayan tek foto-elektron çözünürlüğünden dolayı SiPM kazancı direk olarak sinyal dağılım histogramında görülen komşu iki Gaussian nin ortalama değerleri arasındaki fark ile değerlendirilebilir ve

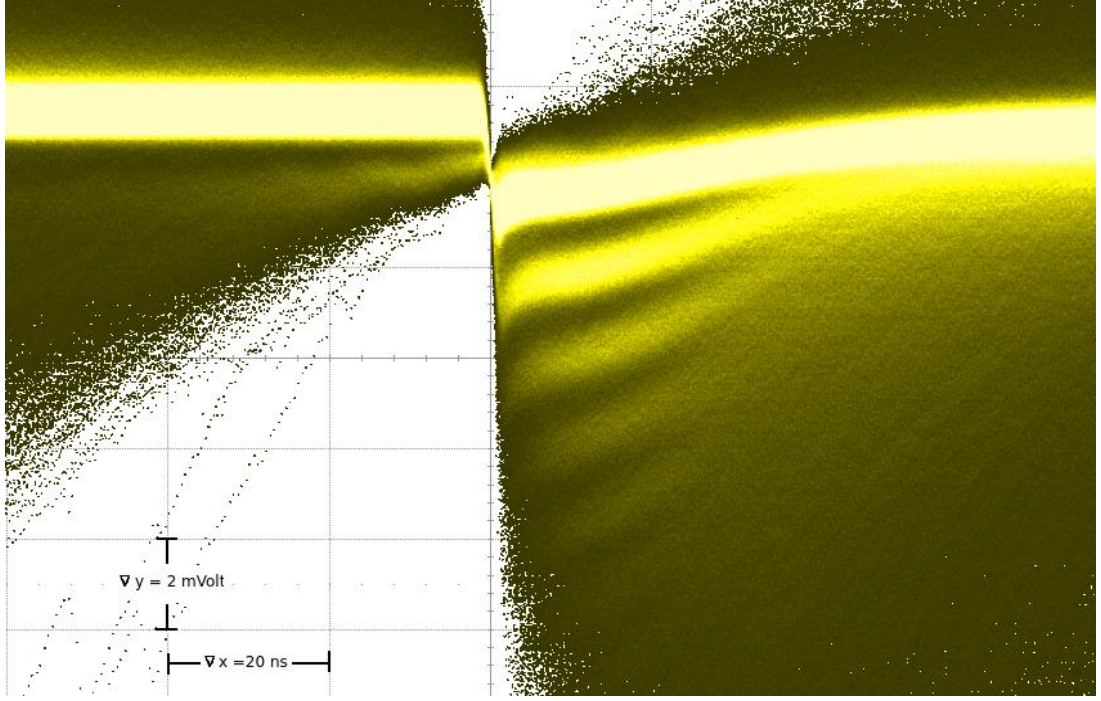
$$G = \frac{(p_{i+1} - p_i)A}{G_{ele}} \quad (3.1)$$

şeklinde verilir. Burada p_i i'ninci Gaussian in ortalama değeri, A analog dijital çevirici (Analog Digital Converter, ADC) çözünürlüğü, G_{el} yükseltici kazancı ve son olarak e ise elektron yüküdür [6].

3.1.3 Elektronik Gürültü (Dark Counts)

SiPM aydınlatılmadığı zaman yani üzerine Led veya ortam ışığı düşürülmediği durumlarda alınan ölçümlerde elektronik gürültüden kaynaklanan sinyaller oluşmaktadır. Bu istemediğimiz türden sahte sinyallerdir çünkü bizim istediğimiz SiPM üzerine gönderilen fotonlardan elde edilen sinyallerdir. SiPM'i meydana getiren her bir pikselin içindeki çığ fotoçoğaltıcının eklem bölgesinde sıcaklıkla rastgele yasak bandı atlayan elektronun oluşturduğu sinyaller sahte veya elektronik gürültü sinyalleri olarak adlandırılmaktadır.

Karanlık bir kutu içerisine yerleştirilen Sensel30035FM SiPM'in ürettiği sahte sinyallerin hepsinin sürekli bir şekilde takip edilip kayıt altına alınan osiloskop ekranı Şekil 3.6'da gösterilmiştir.

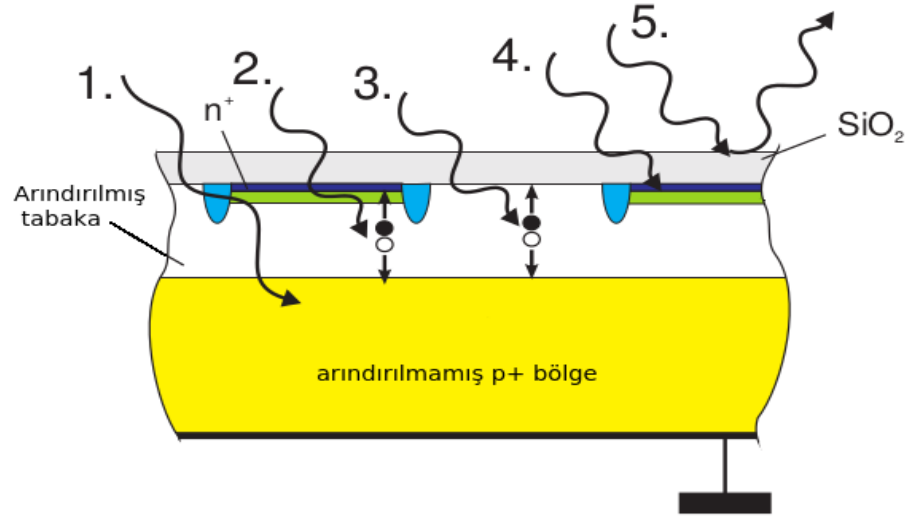


Şekil 3.6 Led kapalıyken elde edilen gürültü sinyallerin sürekli görüntüsü

Oda sıcaklığında milimetrekare sensör alanında saniye başına üretilen sahte sinyal sayısı 10^5 ile 10^6 arasındadır. Termal olarak yeterince soğutulmuş cihazlarda bu tür gürültüyü azaltmak mümkündür. Ayrıca bu sinyalin SiPM'in karakterini anlatan yapısı nedeniyle kazanç karakter analizinde kullanılması uygundur.

3.1.4 Foton Yakalama Verimliliği

SiPM foton yakalama verimliliği (Photon Detection Efficiency, PDE) birçok farklı olasılığın katkısının olduğu bir karakterdedir. SiPM'lerin aksine normal fotoçogaltıcılarda (Photo Multiplier Tube, PMT) bu verimlilik hesaplanırken sadece kuantum verimlilik değeri elde edilip, harici etkenler ihmal edilir.



Şekil 3.7 Işığın SiPM üzerinde düşebileceği kısımlar [7]

Şekil 3.7 bu foton yakalama verimliliğini açıklamak için çeşitli senaryoları barındırmaktadır. Gösterilen senaryolardan arındırılmış bölge dışına ve çığ fotoçoğaltıcı sınırları dışına düşen, bir şekilde yansıyan diğer fotonlar SiPM tarafından yakalanamayanlardır.

Kuantum Verimlilik: Kuantum verimlilik yarıiletkenlerde arınma bölgesindeki bir fotonun dönüştürülmesiyle oluşan elektron-boşluk çiftlerinin sayılarının ortalaması şeklinde tanımlanır. Yeterince enerjilik yani yasak bandı atlabilecek enerjiye sahip fotonun oluşturduğu fotoelektronun çarpma iyonlaşmasına sebep olabilecek enerjiye sahip olmasının ihtimalidir.

Giriş penceresindeki kayıplar: Üzerine gelen ışığın yüzeyden yansımaları ve soğrulmasının sebep olduğu kayıplardır. Bu kayıp mühendislik çalışmalarıyla optik olarak saf ve yansımaları engelleyici malzemeler kullanılarak azaltılabilir.

Etkin olarak verimli alan: SiPM içindeki ışığa duyarlı alanın bütüne olan oranı olarak ifade edilir. Bu SiPMi meydana getiren her bir piksel ayırımının ölü bölgeler oluşturmasından kaynaklanır.

Kırılma ihtimali: Arınma bölgesindeki tek bir elektronun kırılmayı tetiklemesinin olasılığına kırılma ihtimali denir. Bu ihtimal eklem yapıya uygulanan elektrik alana bağlıdır.

Yenilenme süresi: Hali hazırda tetiklenmiş olan SiPM pikselinin tekrardan tamamen tetiklenmeye hazır hale gelmesi periyotuna verilen isimdir. Bu parametre termal olarak tetiklenmiş pikseli oluşturan çığ fotodiyotlarının kendi sönümlenme devresiyle tekrardan eski çalışır değerlerine gelmesi süreci sırasında üzerine düşen parçacığa tepki verememesinden dolayı SiPM PDE'sine olumsuz katkıda bulunur.

Yukarıda açıklanan her bir parametrenin foton yakalama verimliliğine olan etkisi önemlidir. Bu etki parametrelerinin çokluğu PDE yi düşürmektedir [7].

4. SiPM'LERİN SICAKLIĞA GÖRE KAZANÇ KARAKTERİSTİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Silikon fotoçoğaltıcıları oluşturan çığ fotodiyotların sıcaklığa verdiği tepki temelde kazancı etkileyen en büyük faktördür. Bu karakteristiğin deneysel olarak belirlenmesi açık havaya kurulacak dedektör sistemleri için çok önemlidir. Çünkü dedektörün vresel koşullara uyumluluğu bu karakter tespitiyle mümkün olacaktır. TAUWER Projesi kapsamında Sphinx Gözlem evinde kullanılan prototipin maruz kaldığı sıcaklıklar -10°C ile -25°C arasında değişmektedir [8]. TAUWER Projesi için hazırlamış olduğumuz prototipin yukarıda belirtilen sıcaklık aralıklarında da verimli çalışabilmesi için karakter tespiti yapılmıştır.

SiPM kazanç karakter tespiti için soğutucu, termometre, osiloskop, güç kaynağı ve fotooğaltıcıdan oluşan bir deney düzeneği geliştirdik. Bu deney düzeneği oda sıcaklığından -25°C lere kadar silikon fotoçoğaltıcının maruz kalacağı sıcaklık koşullarını sağlamak üzere tasarlandı. Deney düzeneğinin genel hatlarıyla izilmişi Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

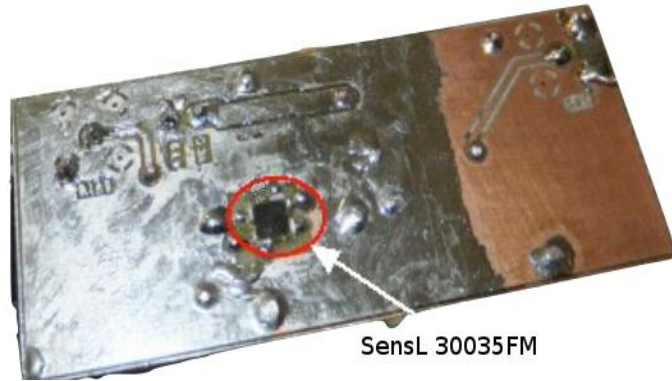


Şekil 4.1 Sensel30035FM SiPM kazanç karakterinin araştırıldığı deney düzeneği

Deney yapılırken soğutucunun yapısı göz önünde bulundurularak SiPM soğutucunun ortasına ve tabanına yakın bir şekilde yerleştirildi. Böyle bir tercihte bulunulmasının temel neden Şekil 4.1’de görüldüğü gibi soğutucu içerisine giren sıcak havanın soğutucunun kapağından girdiği varsayımdır. Bu varsayım soğutucunun içinde farklı bölgelerde sıcaklık ölçümleri yaparak SiPM karakteristiğinin belirleneceği deneye geçilmeden önce yapılmıştır. Böylelikle sistematik bir hatanın önüne geçilmeye çalışılmıştır.

4.1 Deneyde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri

Silikon Fotoçoğaltıcı: Bu SiPM Sensel Firması’nın ürettiği SENSEL30035FM nolu modelidir. Oda sıcaklığında kırılma voltajı 27.5 volt olan 400 nanometre ile 1000 nanometre arasında ışık yakalayabilen %20 oranında parçacık yakalama verimliliğine sahip 3x3 mm² ebadında bir fotoçoğaltıcıdır [9].



Şekil 4.2 SiPM tahtası ve Sensel30035FM

PSA5454 Sinyal Güçlendirici: SiPM’den elde ettiğimiz sinyali güçlendirmek için kullandığımız bir devre elemanıdır. 0.8 db gibi çok küçük bir gürültü oranına sahiptir. 50 MHz’den 4 GHz’ye kadar frekans değerlerinde çalışabilir. Bu sinyal güçlendirici SiPM ile birlikte, Şekil 4.2 de gösterildiği gibi SiPM ile aynı devre tahtası üzerine oturtularak bütünleşik bir şekilde kullanılmaktadır [10].

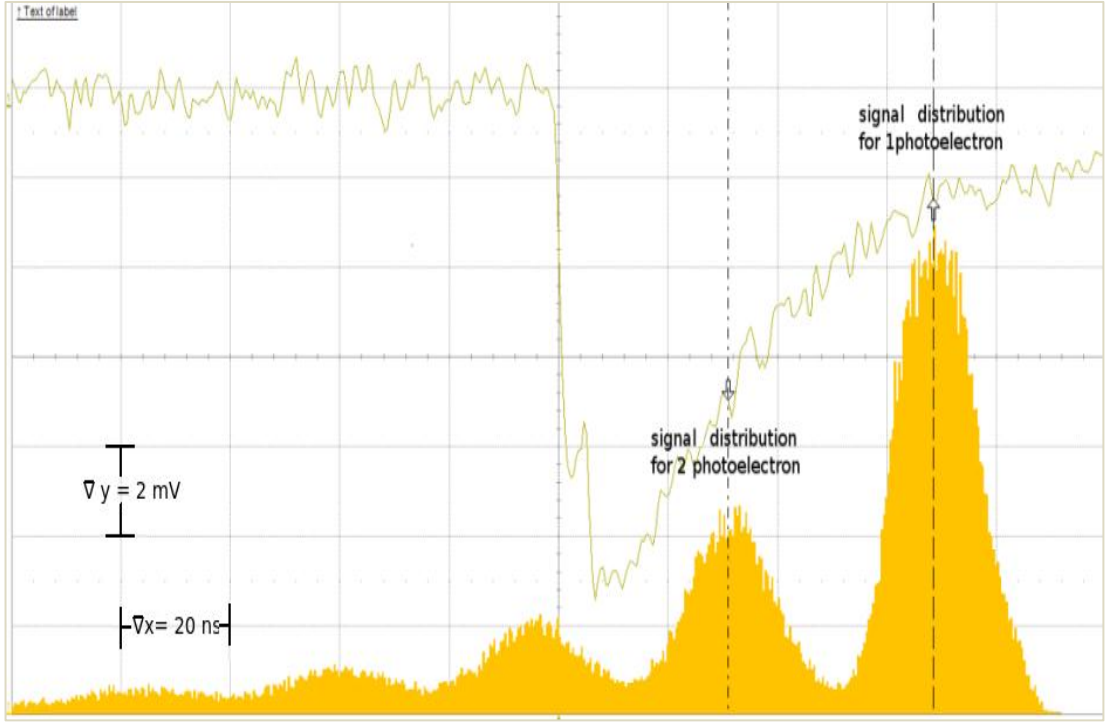
Termometre: Sıcaklık ölçümleri Bontron BT-747D nolu termometre ile yapılmıştır. Bu termometre K tipi termoçift ile kullanıldığında $\pm 0.7^{\circ}\text{C}$ doğrulukla çalışmaktadır. Ayrıca önceden kalibrasyonu yapılmış olan bu termometre daha sonraki çalışmamızda sıcaklık sensörlerinin kalibrasyonunda kullanılmıştır [11].

4.2 Deneyin Yapılış Yöntemi

SiPM'in sıcaklığa bağlı kazanç karakteristiğinin anlaşılmasına çalışıldığı bu deneyde Şekil 4.1 ile gösterilen deney düzeneği kurulduktan sonra oda sıcaklığından -25°C ye kadar çeşitli sıcaklıklarda SiPM'in kendi termal gürültüsü okundu. Termal sinyallerle yapılan bu değerlendirme aslında tek tek foton gönderilerek yapılacak değerlendirmeyle aynıdır. Çünkü SiPM piksellerini oluşturan ters beslemeli diyotların oluşturduğu elektrik alana giren elektron ister foton tarafından tetiklenmiş olsun ister kendi termal enerjisiyle oraya gitmiş olsun sonuçta elektrik alan altında aynı fiziksel süreçten geçeceği için aynı sinyal çıktısını verir.

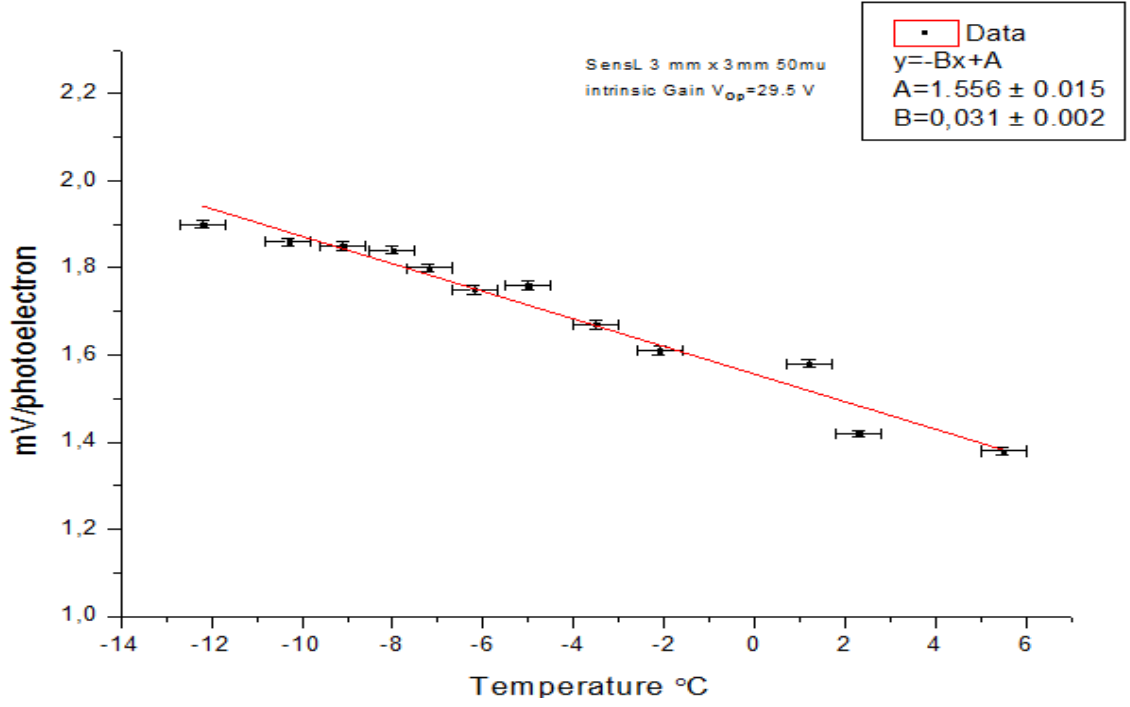
Genel anlamda sıcaklığın sabit zaman aralıklarında SiPM'den okunan sinyaller her bir sıcaklık değeri için ayrı ayrı histogramlara doldurularak bu SiPM'in kazanç değerleri çalışılmıştır.

Şekil 4.3 deki histogram -8°C de yaklaşık 30000 sinyalin minimum voltaj değerinden elde edilmiştir. Bu histogramın karakteristiği SiPM'lerin termal sinyal çıktıları için standarttır. Histogramda görülen sağdan ilk Gaussian dağılım bir fotoelektrona denk gelen sinyallerin hepsini yani bir tek pikselin tetiklendiği sinyallerin bütünü gösterirken hemen yanın da sıralanan diğer Gaussian dağılımlar sırasıyla ikili üçlü dördü piksel sinyallerinin tümünü gösterir.



Şekil 4.3 Sensel30035FM SiPM sinyali ve sinyal değerlerinin dağılım histogramı [12]

Kazanç hesaplaması yapılırken Şekil 4.3'deki histogramlar kullanılarak iki fotoelektrona karşılık gelen Gaussian`nin ortalama değerinden bir fotoelektrona karşılık gelen Gaussian`nin ortalama değeri çıkarılarak ve her bir hesaplama için istatistiksel olarak Welch Prosedürü takip edilerek bir sigma istatistiksel hata payıyla değerler hesaplandı. Sonrasında Sensel30035FM marka SiPM`in sıcaklık kazanç ilişkisini anlamak amacıyla SiPM`in sabit voltaj değerinde (29.5 Volt) çalıştırıldığı çeşitli sıcaklıklardaki SiPM kazanç değerleri hesaplanarak Şekil 4.4'deki grafik elde edildi.

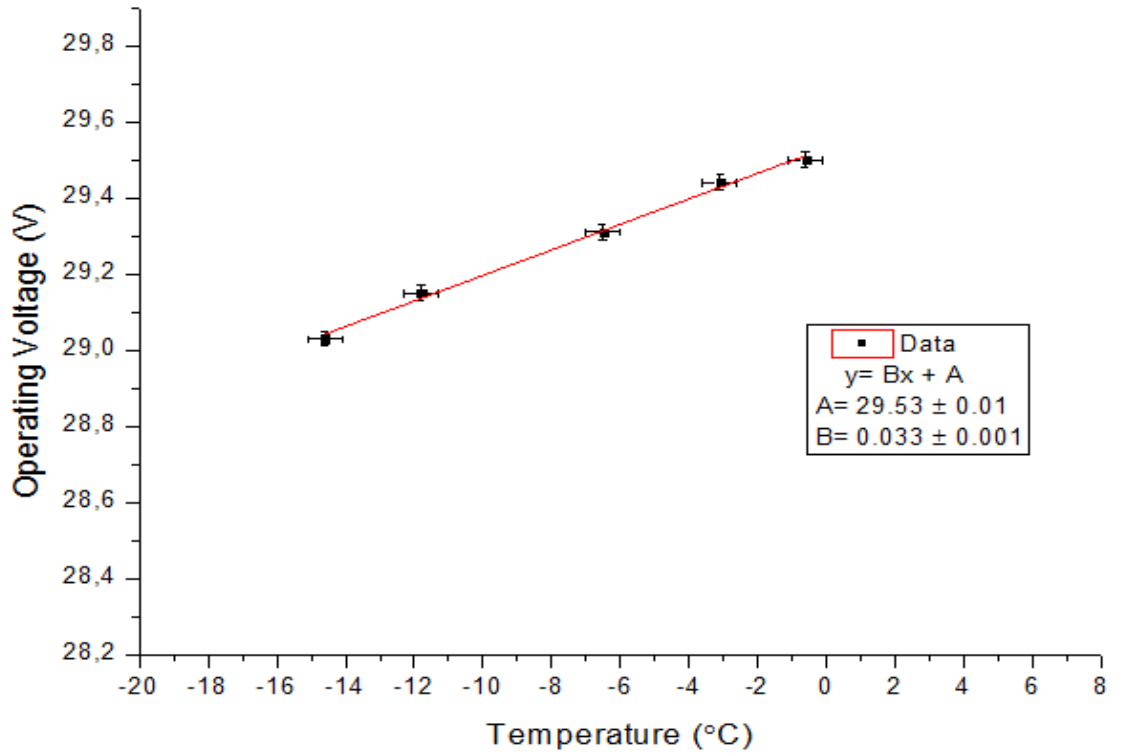


Şekil 4.4 Sabit voltajda kazanç akım grafiği [12]

Şekil 4.4 incelendiğinde TAUWER Projesi kapsamında kullanılması planlanan SiPM'lerin sıcaklığa bağlı kazanç grafiğinin doğrusal olarak değiştiği gözlemlendi. Bu kazancın sıcaklıkla doğrusal değişimi benzer çalışmalarda da gözlemlenmiştir [13]. Gözlem, çığ fotodiyotlarda sıcaklığın düşüşüyle birlikte kırılma voltajının düşeceği ve kazancın artacağı yönündeki bilgilerimizi doğrulamıştır. Yaklaşık olarak 1°C için bir fotoelektrona karşılık gelen voltaj kazancındaki değişim 0.031 mV kadardır.

5. DEĞİŞEN SICAKLIKLARDA SiPM'LERDE KAZANÇ KONTROL EDİLEBİLİRLİĞİ

Sıcaklığın değiştiği koşullarda karakteristiğini bildiğimiz SiPM'lerin kazançlarındaki değişimin düşürülmesi hatta sabit tutulması ölçülen verilerin istikrarı açısından önemlidir. Bu bağlamda hali hazırdaki deney düzeneğimizle değişen sıcaklıklarda SiPM'lerin sabit kazançta çalışabilirliğini inceledik.



Şekil 5.1 Sensel30035FM SiPM için tek fotoelektron başına 1.36 mV kazanç için besleme voltajı ve sıcaklık değerleri [12]

Deneyimiz bir önceki ölçümde anlatıla gelen yöntemlerle gerçekleştirildi. Deney düzeneğini değiştirilmeden sadece sabit tutulan parametre değiştirilerek yapıldı.

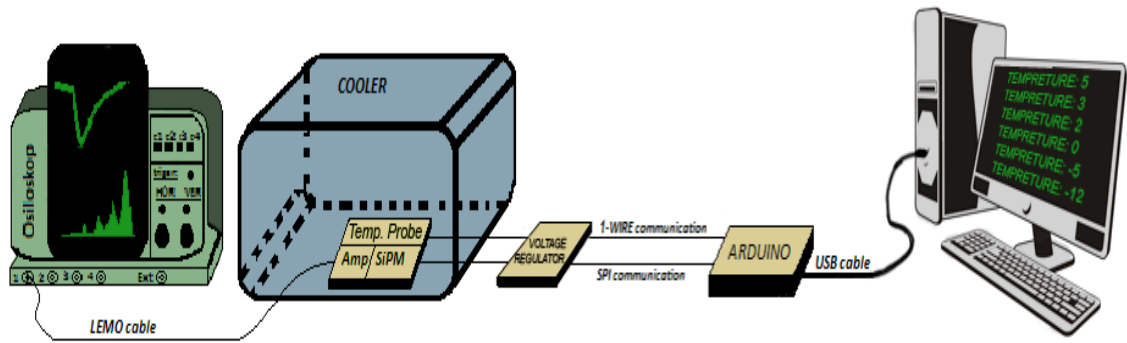
Birbirinden farklı beş sıcaklık değerinde 1.36 mV'luk sabit kazanç elde edilinceye kadar SiPM'in besleme voltajının değerleri değiştirildi. Böylelikle sabit kazancın elde edilmesi için gerekli sıcaklık ve voltaj değerleri belirlenmiş oldu. Şekil 5.1 sabit kazanç için elde ettiğimiz verilerin grafiğini sunmaktadır. Şekilden de açıkça görüldüğü üzere sabit SiPM kazanç değerinde sıcaklık düştükçe besleme voltajı düşmektedir. Zaten Deneysel olarak elde edilen Şekil 4.4'deki grafikte sıcaklığın düşüşüyle SiPM kazancının arttığı görülmekteydi. Bu durumda sıcaklık düştükçe artan kazancın düşürülmesi için SiPM besleme voltajının düşürülmesinin gerekliliği açıktır.

Şekil 5.1'den anlaşılacağı gibi SiPM'ler basit bir sıcaklığa göre voltaj kontrolü yapan devreyle, çevresel koşullardan etkilenmeden sabit kazançla çalıştırılıp kullanılabilirler.

6. SICAKLIK DEĞİŞİMİNE KARŞIN KENDİLİĞİNDEN KALİBRASYON YAPAN SİSTEMİN GELİŞTİRİLMESİ

Bir dizi kalibrasyon ve SiPM karakteristiği belirlenirken ki deney düzeneğinde küçük modifikasyonlar yapmak tezin bu kısmı için gerekli bir hal almıştır. Öyle ki yeni deney düzeneği Şekil 6.1’de gösterildiği gibi yeniden tasarlanmıştır. Dikkat edilecek olursa Arduino, voltaj regülatörü ve SiPM tahtasına ilişkili yeni sıcaklık sensörü ve Arduino kontrolünün ve beslemesinin yapılacağı bilgisayar, düzeneğimize eklenmiştir.

Bahsi geçen ara birimlerden olan Arduino çevresel birimlerin kontrolünü yapacak olan mikroşlemcidir. Arduino okuduğu sıcaklık değerine karşılık SiPM karakteristiğinin bilgisine sahip olduğu bu tez kapsamında geliştirilen yazılımıyla voltaj regülatörünü kontrol edecek ve SiPM’in sabit kazançta çalışmasını sağlayacak olmasından dolayı deney düzeneğinin en kilit ara birimidir.



Şekil 6.1 Sensel30035FM SiPM kazanç kalibrasyonunun test düzeneği

Şimdi sırasıyla eklenen yeni ara birimleri teker teker ele alalım.

6.1 Sıcaklık Sensörleri

Deney düzeneğinde Sphinx'deki istasyonda kullanılmak üzere laboratuvarında uygunluğu test edilecek olan iki sıcaklık sensörü kullanılmıştır. Sırasıyla bu sıcaklık sensörleri Dallas DS18S20 ve Texas LM35'dir.

6.1.1 Dallas DS18S20

DS18S20 dijital termometresi 9-bit lik Celsius birimiyle ölçümler yapar. Bunun yanı sıra alarm fonksiyonu da mevcuttur. Bu sensör merkez mikroişlemci ile 1-Wire iletişim protokolü ile veri transferi gerçekleştirmektedir. Ölçüm yapabilme aralığı -55°C den 125°C ye kadarken $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ doğrulukla -10°C den 85°C ölçüm yapabilmektedir. Ayrıca en fazla 750 ms gibi bir sürede hızlıca ölçüm yapabilir.

Bahsi geçen özelliklerin her biri deneysel sistemler için önemli olmakla birlikte bu sensörün esas kullanışlı tarafı dijital olmasının uzun kablo kullanımında veri kayıplarına engel olması ve her bir DS18S20 kendi eşsiz 64-bit seri kod yapısıyla tek bir kanal üzerinden çoklu sensör kullanımına imkân vermesidir [14].

6.1.2 Texas LM35

LM35 serisi hassas, voltaj çıkış değerleri sıcaklığın Celsius birimiyle orantılı şekilde seyreden bütünleşik devre sıcaklık termometreleridir. Ölçüm yapabilme aralığı $\pm 3/4$ doğrulukla -55°C den 150°C kadar değişmektedir. Bu termometrenin kullanılabilmesi için üretici tarafından sağlanan devre şemasının hazırlanması şarttır. Ayrıca analog olması sebebiyle uzun kablo kullanımında kablo direncinden dolayı voltaj kaybı yaşanması mümkündür [15].

6.3 Arduino

Arduino, fiziksel dünya ile iletişim ve etkileşim kurmanızı sağlayan bir araçtır. Açık kaynak kodlu basit bir mikroişlemci devresi ve bu devreyi programlamamıza yarayan bir yazılım paketinden oluşmaktadır. Bu çalışmamızda bütün modelleri Şekil 6.3’de gösterilenlerden Arduino Due kullanılmıştır.



Arduino Uno



Arduino Leonardo



Arduino GSM Shield



Arduino Due



Arduino Esplora



Arduino Ethernet Shield

Şekil 6.3 Arduino modelleri [16]

Donanım olarak Arduino: Bilgisayara USB ara yüzü ile bağlanan basit bit mikroişlemci devresidir. Kendi başına otonom bir şekilde çalışabileceği gibi bilgisayara bağlanıp bilgisayarımızın fiziksel dünya ile iletişim kurmasını sağlayabilen bir alettir.

Yazılım olarak Arduino: Arduino donanımının programlandığı, çeşitli kütüphaneler vasıtasıyla ‘kod uzmanı’ olmadan birçok ek aletin Arduino tarafından kontrol edilebilmesini sağlayan uygulamaların geliştirildiği yazılımdır.

6.3.1 Arduino'nun Tercih Sebepleri

a) Kullanımı dostudur. Arduino programını yükledikten sonra tek ihtiyacınız olan bir adet USB kablosudur. Programlamak için derin donanım bilgisine ve genellikle kullanımı zor olan geliştirme araçlarına ihtiyacınız yoktur.

b) Ucuzdur. Bahsedildiği gibi ekstradan geliştirme aletlerine ve pahalı yazılımlara ihtiyacınız olmadan sadece bir adet Arduino Board alarak (ya da kendiniz yaparak) Arduino ile proje geliştirmeye başlayabilirsiniz.

c) Windows, Linux ve MacOS işletim sistemleri altında çalışmaktadır.

d) En önemlisi Açık kaynak kodludur. Arduino yazılımını özgürce kendi istekleriniz dâhilinde değiştirebilirsiniz ve yayınlanan devre şemalarını kullanarak kendi Arduino uyumlu devrenizi tasarlayabilirsiniz.

6.3.2 Çevresel Birimlerin Arduino ile Kontrolü

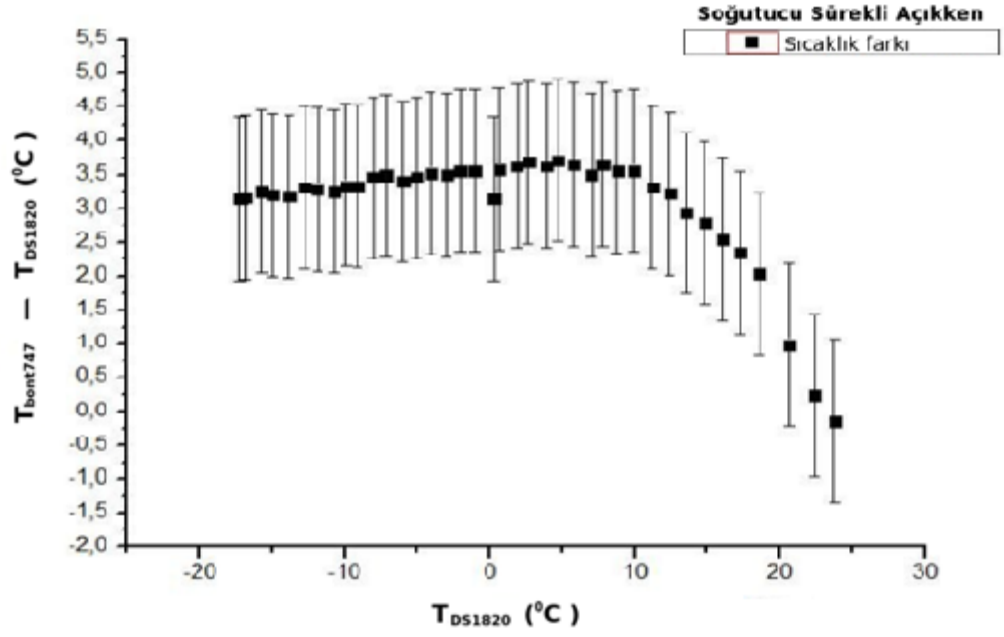
6.3.2.1 Arduino ile Sıcaklık Ölçümü

DS1820 sıcaklık sensörü ile sıcaklık değeri Arduino ile okunurken 1-Wire Kütüphanesi kullanılır. DS1820 bu protokolda köle olurken Arduino efendidir. Ayrıca sıcaklık değerinin okunması için takip edilen bir prosedür vardır. Öncelikle her işlemten önce protokol yeniden başlatılır. İlgili adresteki sensöre sıcaklık ölçümüne başlanması için emir verilir. Sonrasında yine aynı adresteki sensöre az önce kendi Karalama Tahtasına (Scratchpad) yazdığı bilgiyi okumak için başka bir komut yollanır ve böylece veri okuması tamamlanmış olur. Okunan bu veri dijital olduğundan üretici tarafından sağlanan

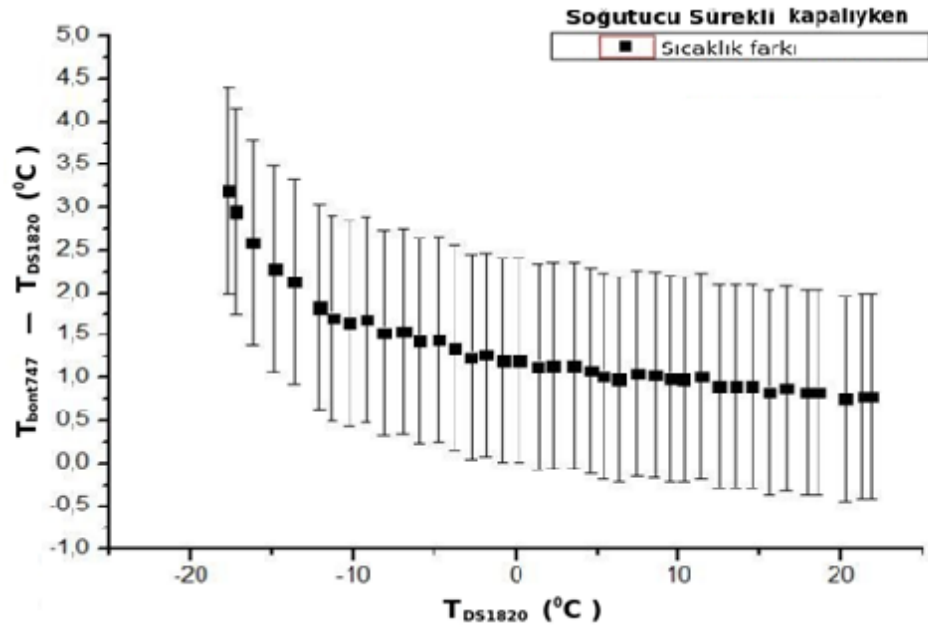
kontrolün yapılması gerekmektedir. Bu deney yapılırken Hali hazırda daha önce kullandığımız ve kalibre olduğunu bildiğimiz Bontron747 den faydalandık.

Deney soğutucu içinde aynı ölçüm noktasında bulunan DS1820 ile Bontron747'nin termoçiftinin gösterdiği değerler karşılaştırılarak yapıldı. Deney yapılırken soğutucunun içine kapaktan sızan ısının sürekli olarak ortamı ısıttığı durum ve soğutucu sürekli çalışır durumdayken soğuk hava deviniminin sürekli arttığı durum olarak iki süreç belirlendi. Her bir durum için elde edilen değerlerce grafikler çizdirildi.

Çizdirilen grafikler incelendiğinde ortam sıcaklığının sürekli düştüğü durum için yapılan ölçümde (Şekil 6.5) en baştaki hızlı sıcaklık fark artışının belli bir süre sonra yaklaşık olarak $+3^{\circ}\text{C}$ gibi sabit bir değere oturduğu gözlenmiştir. Benzer şekilde ortam sıcaklığının sürekli arttığı durum için yapılan ölçümde (Şekil 6.6) birden bire düşen sıcaklık farkının belli bir süre sonra yaklaşık $+1^{\circ}\text{C}$ gibi sabit bir değere ulaştığı görülmüştür. Ancak bu iki grafikte sistemin hızlıca soğuduğu ve hızlıca ısındığı durumlar için iki ölçüm cihazı arasındaki farkın hızlıca değiştiği açıktır. Bu karakteristik davranış DS1820'nin sıcaklığın hızlıca değiştiği durumlarda tampon bir sıcaklık değişimi yaşadığını söylemektedir.

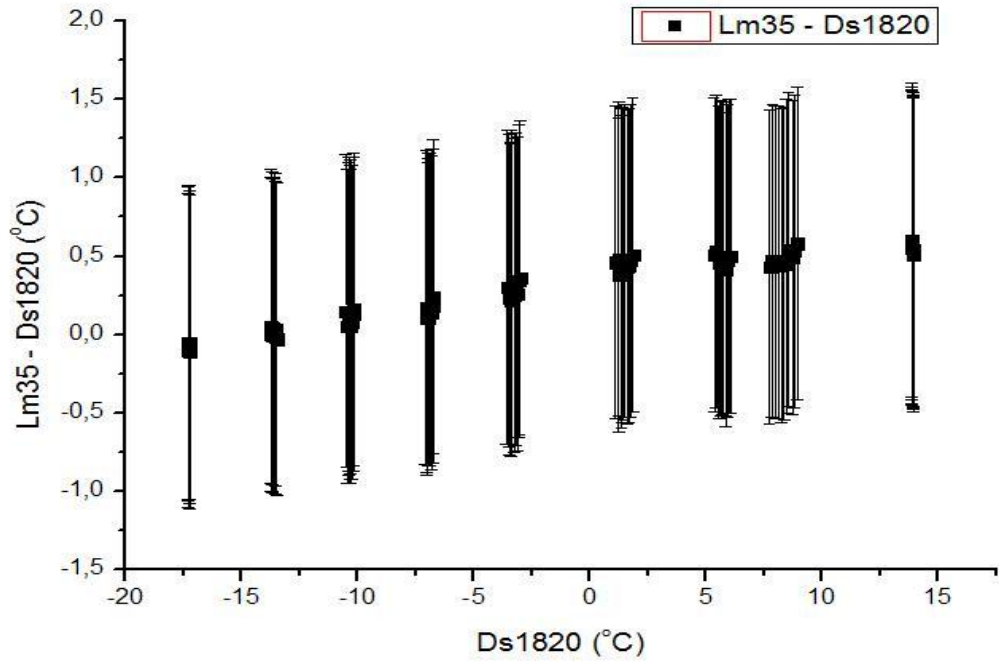


Şekil 6.5 Soğutucunun sürekli açık olduğundaki sıcaklık farkı



Şekil 6.6 Soğutucunun sürekli kapalı olduğundaki sıcaklık farkı

Neticede DS1820 sıcaklık sensörünün deneysel kalibrasyonu için kullanılabilecek sabit sıcaklık farklarının uygulanması mümkün olmadığı kararına varılmıştır. Ancak bir şekilde DS1820 nin güvenilirliği test etmemiz gerektiğinden başka bir sıcaklık sensörü olan LM35 ile benzer bir deney gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Şekil 6.7’de gösterilmiştir.



Şekil 6.7 Soğutucunun sürekli açık olduğundaki sıcaklık farkı

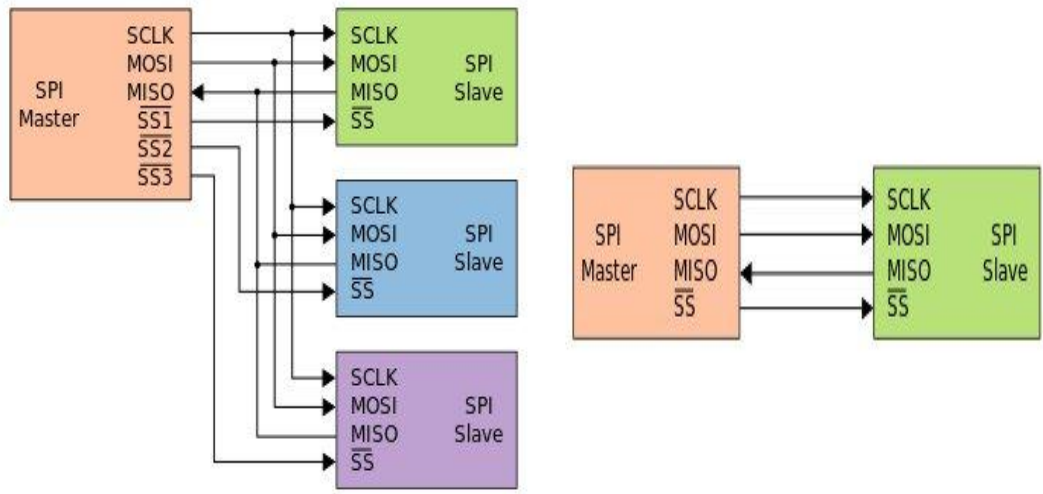
Şekil 6.7’de değerleri gösterilen bu ölçümdeki sıcaklık farkları hata payları içinde olduğundan, DS1820 bir düzeltme faktörüne ihtiyaç duymadan kullanılabileceği konusunda bize güven vermektedir.

6.3.2.3 Arduino ile Voltaj Regülatörün Kontrolü

Voltaj regülatöründen bahsederken bu PCB içinde bulunan Max1932’nin SPI protokolüyle kontrol edildiğini söylemiştik. Bu bakımdan Arduino ile Max1932’nin kontrol edilmesi için bu protokolün anlaşılması önem arz etmektedir.

SPI veri yolu Full Duplex durumda çalışan senkron bir seri veri bağlantısı standardıdır. İsmi Motorola tarafından belirlenmiştir.

Efendinin veri çerçevesini başlattığı, bağlantı şeması Şekil 6.8 ile verilen, cihazların efendi köle modunda birbirleriyle iletişime geçtiği çok telli bir veri bağlantısıdır. Bir efendi tarafından kontrol edilen birden fazla köle cihaz olduğu durumda “köle seçim” bağlantısı da mevcuttur.



Şekil 6.8 SPI veri yolunun tekli ve çoklu efendi köle bağlantı şeması [17]

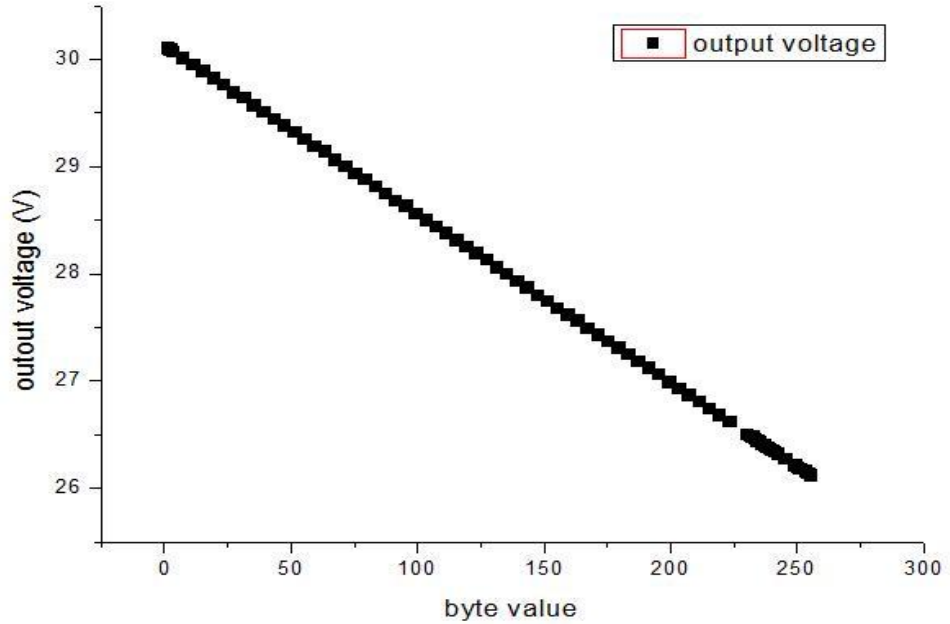
SPI veri yolunu dört lojistik sinyal tanımlar:

- Seri Saat (Serial Clock, SCLK): Efendi ve köle arasındaki eşzamanı sağlar.
- Efendi Çıkış, Köle Giriş (Master Output, Slave Input, MOSI): Efendinin taşıdığı verinin köleye iletiildiği hattır.
- Efendi Giriş, Köle Çıkış (Master Input, Slave Output, MISO): Kölenin taşıdığı verinin efendiye iletiildiği hattır.
- Köle seçim (Slave Select, SS): Köle seçimini sağlayan hattır düşük değerinde aktif.

SPI veri yolu standardı gereğince Arduino bizim düzeneğimiz için efendi Max1932 köledir. Arduino 1-Wire da olduğu gibi SPI kütüphanesiyle birlikte gelmektedir. Arduino kölesi olacak cihazlarla doğru şekilde bağlandıktan sonra yazılımın yazılacağı ara yüze bir kütüphane tanımlanır ve SS bağlantısının düşük sinyal olduğu durumda emirlerini kölesine bildirir.

Max1932'nin sahip olduğu DAC'm 8-bit ile kontrol edilebildiğini biliyorduk. Buradan çıkış voltajının 2^8 farklı değere kademeli olarak değişmesi gerektiğini anlıyoruz yani dijital 2^8 değere karşılık gelen voltaj değerleri olmalıdır. Bu sebeple hangi byte değerinde hangi voltajı sağladığı belirlenmelidir.

Laboratuvarında yapılan çalışmalarda bu karakteristiği belirlemek bu byte noktalarına karşılık gelen voltaj değerlerini anlamak için Arduino ile Max1932 bağlantıları yapıldıktan sonra SPI veri bağlantısı standarttı ile belirli byte değerlerini Max1932 ye ilettik ve voltaj çıktısını voltmetre ile okuduk. Okunan veriler kayıt edildikten sonra karakteristiğini anlamak üzere çıkış voltajına karşın byte grafiğini çizdirdik.



Şekil 6.9 Max1932 nin çıkış voltajı değerlerinin byte karşılıkları

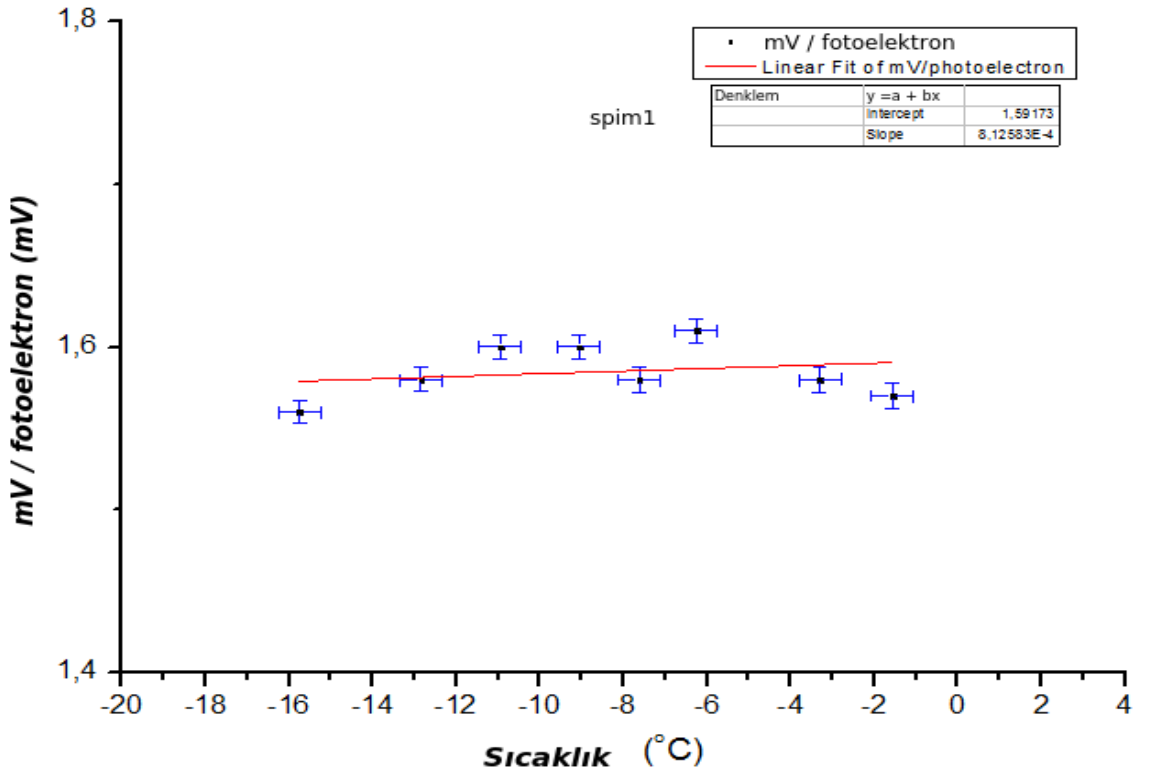
Şekil 6.9’da gösterilen değerlerin kullanımının bir çok yolu vardır bunlardan birisi her bir voltaj değerine karşılık gelen byte değerinin bir veri kataloğundan okutulması ya da grafikte de açıkça görülen doğrusal karakter kullanılarak algoritma oluşturulması olabilir. Otonom deney sistemimiz hazırlanırken biz doğrusal davranışın kullanıldığı algoritmayla Max1932’yi kontrol etmek için kullandık.

7. SONUÇ ve TARTIŞMA

7.1 SiPM Sabit Kazanç Kalibrasyonu

Sabit SiPM kazancında çalışabilen prototipin kalibrasyonun tamamlanması ve kontrol edilmesi tez konusu çalışmaların son bölümünü oluşturmaktadır.

Şekil 6.1'deki düzenek doğrultusunda yukarıda tek tek adımları anlatılan elektronik ayarlamalar ve TAUWER prototipinin ekipmanlarının belirlenmesi süreçleri tamamlandı. Sonrasında bütün çevresel donanımların mikroişlemci tarafından kontrol edilmesini sağlayan, SiPM karakteristiğinin bilgisini barındıran algoritma mikroişlemci içerisine yerleştirildi böylelikle SiPM'in değişen sıcaklık değerlerinde sabit kazançta çalışmasını sağlayacak olan prototip geliştirilmiş oldu..



Şekil 7.1 SiPM sisteminin değişen sıcaklıklardaki kazanç grafiği

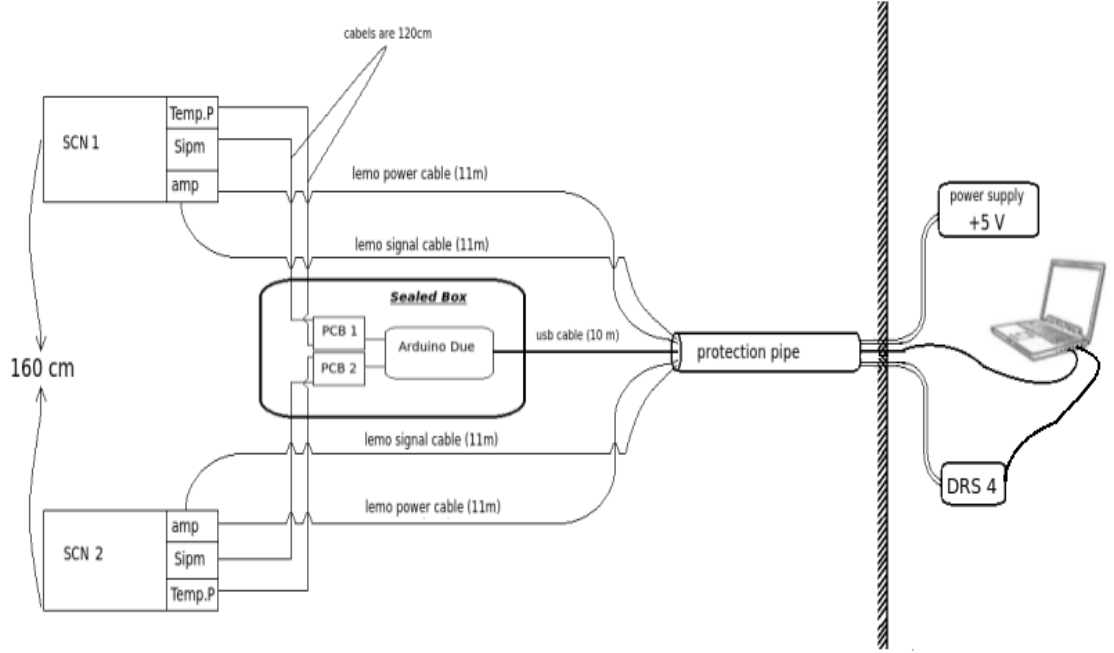
Hazırlanan prototipin değişen sıcaklıklarda doğru şekilde çalışıp çalışmadığının bilgisi Şekil 7.1'deki sıcaklığa karşı SiPM kazanç grafiğince gösterildi.

Farklı sıcaklıklardaki 8 veri noktasında yapılan SiPM kazanç hesaplamalarının gösterildiği Şekil 7.1'deki grafikten anlaşılacağı üzere yaklaşık 1.6 mV luk kazanç değeri yapılan yeni SiPM sistemiyle sağlanmıştır. Bu llen kazanç değerindeki süreklilik artık değişen sıcaklık koşullarında, sabit kazançta SiPM'in çalışmasını sağlayan prototipin güvenli bir şekilde çalıştığını bize anlatır.

7.2 Yeni Sphinx Deney Prototipi

Bu yüksel lisans Tezi kapsamında ve TAUWER projesi dahilinde gerçekleştirilen SiPM karakteristiğinin belirlenmesi, değişen sıcaklıklarda sabit SiPM kazanç değerlerinde çalışan dedektör prototipin oluşturulup kalibrasyonun yapılması çalışmaları gerçekleştirildi.

Yapılan alışmalar TAUWER projesinin prototiplerin parçacık yakalamak maksadıyla denendiği İsviçre'de bulunan Sphinx istasyonuna şeması Şekil 7.2'de verildiği şekilde yerleştirildi.



Şekil 7.2 Sphinx istasyonuna kurulan deney düzeneği

7.3 Tartışma

Bu tezde, Yüksek enerji fiziğinde son yıllarda fotoçoğaltıcılar arasında giderek popülerliği artan SiPM'ler incelendi. SiPM'in farklı sıcaklık değerlerindeki kazanç değişimi tanımlandı, elde edilen verilerde sıcaklığın düşüşü ile doğrusal olarak kazanç arttığı belirlendi. Bunun yanında 29.5 V beslemeyle çalıştırılan SenSEL30035FM marka SiPM'lerde her 1°C sıcaklık değişimine bir foton için 0.031 mV luk kazanç değişiminin karşılık geldiği görüldü. Sonrasında besleme voltajı kontrol edilerek kazançtaki değişim sabitlenmeye çalışıldı. Bu çalışma hem 1.36 mV luk kazanç için el yordamıyla SiPM beslemesinin değerlerine müdahale edilerek yapılırken hem de kendi başına çalışabilecek otonom bir sistem geliştirilerek 1.60 mV luk kazanç için yapıldı. Yeni geliştirilen kendiliğinden voltaj kontrolü yapabilen sistemle sabit kazançta çalışan dedektör prototipi hazır hale getirilmiş oldu.

Bundan sonraki adımlarda laboratuvarda yapılan çalışmaların benzerlerinin gerçek deney alanında (Sphinx istasyonu) yapılması kalibrasyonun daha iyi bir hale getirilmesine yardımcı olacaktır. Çünkü asıl deney alanında yapılacak tez dahilindeki benzer çalışmalar, laboratuvar da yaratılan deney ortamından daha soğuk ortamda SiPM karakterinin nasıl değişebileceği, deneysel olarak bulduğumuz sonuçtan sapma gosterip gostermeyeceği hakkında bilgi verecektir.

KAYNAKLAR

- [1] Techniques for Nuclear Physics Experiment 1987 by Springer-Verlag, Dr. William R. Leo, ISBN 3-540-17386-2
- [2] www.kasap.usask.ca/sampleillustration/ (erişim tarihi 10/01/2014)
- [3] Physics of Semiconductor Devices 1969 by Jhon Wiley & Sons, Inc, S.M.SZE, SBN 471 84290 7.
- [4] Study of Silicon Photomultipliers, 2004, master thesis of Joëlle Barral, Ecole Polytechnique.
- [5] www.sensel.com (erişim tarihi 19/12/2013)
- [6] Preliminary study of silicon photomultipliers for space missions. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 572 (2007) 662-667.
- [7] The Silicon Photomultiplier – A new Device for High Energy Physics Astroparticle Physics, Industrial and Medical Application SINC Symposium, Stanford, California, 3-6 April 2006
- [8] SiPM application for UHE neutrinos tested as Sphinx Station, RICAP-13 Roma International Conference on AstroParticle Physics Book of abstracts 12, 22 May 2013 - Friday 24 May
- [9] Sensel MicroFM Fast silicon Photomultiplier Family Datasheet, <http://sensl.com/products/silicon-photomultipliers/> (erişim tarihi 20/02/2014)
- [10] Maxim Digitally Controlled 0.5% Accurate, Safest APD, Bias Supply datasheet, 19-2555; Rev1; 12/02
- [11] www.bontron.com.tw (erişim tarihi 18/02/2014)

- [12] SiPM application for a detector for UHE neutrinos tested at Sphinx Station, Elsevier, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A, DOI:10.1016/j.nima.2013.11.076, (2013)
- [13] M.Ramilli. Chracterization of SiPM: temperature dependencies. in Nuclear Science Symposium Conference Record, 19-25 October 2008.
- [14] DALLAS Semiconductor DS1820 1-Wire Digital thermometers datasheet
- [15] Texas Instrument LM35 precision centigrade temperature Sensors Datasheet SNINS159B
- [16] www.arduino.cc (erişim tarihi 02/01/2014)
- [17] www.en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface_Bus (erişim tarihi 15/04/2013)

ÖZGEÇMİŞ

İSMAİL OKAN ATAKİŞİ

Doğum yılı: 19/12/1985

Doğum yeri: İstanbul Fatih

Uyruğu: T.C.

Eğitim durumu:

Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Yüksek lisans: Yüksek Enerji ve Parçacık Fiziği (2011-)

Marmara Üniversitesi (2005-2010)

Lisans: Fen Edebiyat Fakültesi Fizik

Marmara Üniversitesi (2004-05)

Lisans öncesi İngilizce hazırlık

Atışalanı Lisesi (İstanbul)(2003)

Lise (sayısal)

Lisans Bitirme projesi, Y.Lisans Çalışmaları ve Sunumlar

Bitirme projesi:

Pozitronyum yok olma spektroskopisi (lisans)

Danışman: Prof.Dr .Uğur YAHŞİ

Çalışmalar:

Sintilatör Dedektörleriyle müon tespiti ve lifetime ölçümü (Y. Lisans)

Danışman: Prof. Dr. Mithat KAYA

Kars bölgesinde kozmik ışın akı yoğunluğu (Y. Lisans)

Danışman: Prof. Dr. Mithat KAYA

Açık alan kozmik parçacık dedektörleri için Sipm kazancı araştırması ve kalibrasyonu (Y. Lisans)

Danışman: Prof. Dr. Mithat KAYA ve Prof. Dr. Maurizio IORI

Yabancı Dil Bilgisi

Marmara üniversitesinde lisans öncesi 1 yıl İngilizce hazırlık eğitimi aldım. 2009'da "work and travel" programı ile New Jersey de bulunarak 3 ay Casino Pier adlı eğlence parkında insanlarla aktif iletişimde bulundum. 2013 başından itibaren 5 ay süreyle Erasmus Staj Hareketliliği kapsamında İtalya'da Roma Üniversitesi "La Sapienza" da bulundum.

Çalıştığı Programlama Dilleri

C++, ROOT, Shell, Comphep, Pythia, Mathematica

Yayınları (SCI ve diğer)

1. "SiPM application for a detector for UHE neutrinos tested at Sphinx Station", Elsevier, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A DOI:10.1016/j.nima.2013.11.076 by (M. IORI, I.O. Atakisi, G.Chiodi, H. Denizli, F. Ferrarotto, M.Kaya, A.Yilmaz, L. Recchia, J. Russ
2. "Investigation and Calibration SIPM Gain for Outside Astroparticle Detectors", TFD-30: Türk Fizik Derneği 30. Uluslararası Fizik Kongresi özet kitabı s. 204 I.O.ATAKİŞİ, M. KAYA, M. Iori (2013)
3. "Kars bölgesinde ölçülen kozmik ışın akı yoğunluğu", TFD-30: Türk Fizik Derneği 30. Uluslararası Fizik Kongresi özet kitabı s. 203 M. ATAKAN, I.O. ATAKİŞİ, M. KAYA (2013)

İş Deneyimi:

Yüksek lisans öğrenimim boyunca Kafkas Üniversitesi ve Roma La Sapienza Üniversitesi laboratuvarlarında Sintilasyon dedektörleri ve Silikon-PMT ler üzerine çalıştım. Buralardaki çalışmalarım ile yüksek enerji fiziğinde sıkça kullanılan Nim crate ve modüllerine aşina hale gelip elektronik bilgimi geliştirdim ve bunlara ek olarak Arduino gibi yaratıcı ekipmanlarla çevresel koşullara uygun dedektör yapımı ve geliştirmesi üzerine uygulamaya dönük bilgiler edindim.

Lisans öğrenimim boyunca ise Western Digital'e bağlı olarak gerek yarı zamanlı gerekse tam zamanlı teknosa, mediamarkt ve bimeks te çalıştım.

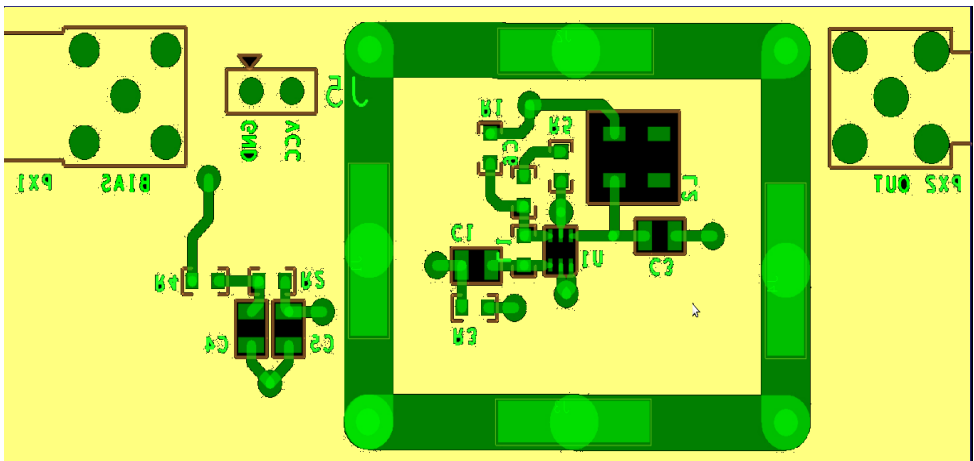
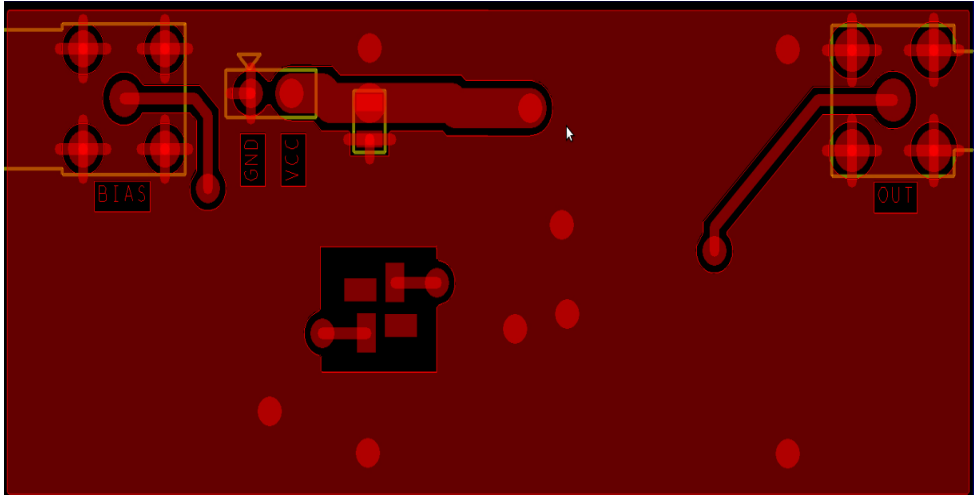
Hobileri :

Fırsat buldukça tenis, futbol,basketbol gibi sporları yapmayı sever, avrupa ve amerikan filmlerini izleyerek vakit geçirmekten hoşlanırım..

İletişim Bilgileri

E-posta: atakisi.okan@gmail.com

Tel: 05556231497



Ek-2 Arduino Yazılım

```
//Dedectors gain configuration for Tauwer project
// Authors I.Okan Atakisi
//libraries start
#include <SPI.h>
#include <OneWire.h>

#####Declarations#####
//spi connection
const int slaveSelectPin1=2; //define pins
const int slaveSelectPin2=12;
//define value to use in loop as true and false
int inception1=0;
int inception2=0;
//ds1820
float Temp1;
float Temp2;
byte data[12];
OneWire ds(10); // on pin 10
byte addr1[8]={0x10,0xB8,0x2B,0x94,0x02,0x08,0x00,0x03};
byte addr2[8]={0x10,0x02,0x3A,0x94,0x02,0x08,0x00,0x7A};
#####Declarations#####
//class for linear fonk and rounded number
class lineer {
public:
int k;
float x,m,n;
float y(){
return((m*x)+n);
}
int ry(){
k=y();
if((y()-k)>=0.5)
return(k+1);
else
return(k);
}
};
#####fonctions for ds1820#####
void writeTimeToScratchpad(byte* address)
{
ds.reset(); // reset protocol
ds.select(address); // select address externally
ds.write(0x44,1); //important command to write data into scratchpad
delay(1000); // wait writing for 1 second
}

void readTimeFromScratchpad(byte* address, byte* data)
{
ds.reset(); // reset protocol
ds.select(address); // select adress externally
ds.write(0xBE); // important command to get temp data from scratchpad
for (byte i=0;i<9;i++)
{
data[i] = ds.read(); // write temp data
}
}
//Use algorithm insede function to understandable temp data
float gettemperature(byte* address)
{
writeTimeToScratchpad(address);
readTimeFromScratchpad(address,data);
float t=data[0];
int in_t=data[0];
float mt=256-t;
float mtr=mt/2;
float tr = t/2;
float kalan=in_t%2;
int negatif=data[1];
float cpc=data[7];
float cr=data[6];
float fark = cpc-cr;
float bolum;
if(fark!=0)
{
```



```

    bolum=fark/cpc;
  }
  else {
    bolum=0;
  }
  if (negatif) // eger negatifse
  {if(kalan!=0)
    return (-mtr-0.25+bolum); // pozitif tebunu yap
  else
    return(-mtr+0.25+bolum);
  }
  else
  {
    if(kalan!=0)
      return (tr -0.25 +bolum);
    else
      return (tr +0.25+bolum);
  }
}
//Use algorithm insede function to understandable temp data
#####functions for ds1820####
#####functions for max1932####
//use Spi library funtions
int digitalPotWrite(int address, int value) {
  // take the SS pin low to select the chip:
  digitalWrite(address,LOW);
  // send in the address and value via SPI:
  SPI.transfer(value);
  // take the SS pin high to de-select the chip:
  digitalWrite(address,HIGH);
}
#####functions for max1932####

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  //set SS as an output
  pinMode(slaveSelectPin1,OUTPUT);
  pinMode(slaveSelectPin2,OUTPUT);
  SPI.begin(); //initialize SPI
}
void loop() {
  delay (5000);// delaying 5 second
  if(inception1!=1)
  {
    for (int level = 0; level < 7; level++)
    {
      switch (level)
      {
        case 0:
          digitalPotWrite(slaveSelectPin1, 231);
          digitalPotWrite(slaveSelectPin2, 237);
          Serial.println("26.5");
          delay(1000);
          break;
        case 1:
          digitalPotWrite(slaveSelectPin1, 199);
          digitalPotWrite(slaveSelectPin2, 205);
          Serial.println("27");
          delay(1000);
          break;
        case 2:
          digitalPotWrite(slaveSelectPin1, 167);
          digitalPotWrite(slaveSelectPin2, 173);
          Serial.println("27.5");
          delay(1000);
          break;
        case 3:
          digitalPotWrite(slaveSelectPin1, 135);
          digitalPotWrite(slaveSelectPin2, 141);
          Serial.println("28");
          delay(1000);
          break;
        case 4:
          digitalPotWrite(slaveSelectPin1, 103);
          digitalPotWrite(slaveSelectPin2, 110);
          Serial.println("28.5");
          delay(1000);

```

```

break;
case 5:
digitalPotWrite(slaveSelectPin1, 71);
digitalPotWrite(slaveSelectPin2, 78);
Serial.println("29");
delay(1000);
break;
case 6:
digitalPotWrite(slaveSelectPin1, 40);
digitalPotWrite(slaveSelectPin2, 47);
Serial.println("29.5");
delay(1000);
break;
default:
digitalPotWrite(slaveSelectPin1, 0);
digitalPotWrite(slaveSelectPin2, 0);
Serial.println("3.3");
return;
}
}
inception1=1;
Serial.println("start and go");
delay(1500);
}
else
{
//getting temperature from ds1820
Temp1=gettemperature(addr1);
Temp2=gettemperature(addr2);
//getting temperature from ds1820
//dedektor 1
lineer TemptoVolt1;
TemptoVolt1.x= Temp1;
TemptoVolt1.n=29.431;
TemptoVolt1.m=0.0385;
lineer maxim1;
maxim1.x=TemptoVolt1.y();
maxim1.m=-63.71;
maxim1.n=1919.51;
int volt1=0;
float Svolt1=0;
if(maxim1.ry() <=255){
if(maxim1.ry()>=1){
volt1=maxim1.ry();
}
else{
volt1=1;
Svolt1=1;
}
}
else{
volt1=255;
Svolt1=255;
}
digitalPotWrite(slaveSelectPin1,volt1);
//dedektor 1
//dedektor 2
lineer TemptoVolt2;
TemptoVolt2.x= Temp2;
TemptoVolt2.n=29.431;
TemptoVolt2.m=0.0385;
lineer maxim2;
maxim2.x=TemptoVolt2.y();
maxim2.m=-63.35;
maxim2.n=1919.26;
int volt2=0;
float Svolt2=0;
if(maxim2.ry() <=255){
if(maxim2.ry()>=1){
volt2=maxim2.ry();
}
else{
volt2=1;
Svolt2=1;
}
}
}
else{

```

