



# Altıgen Bor Nitrür Kusur Merkezlerinden Elde Edilen Tek-Fotonlar ile Kuantum Kriptoloji

PROJE SONUÇ RAPORU

**Program Kodu:** Uluslararası COST

**Proje No:** 117F495

**Proje Yürütücüsü:** Doç. Dr. Serkan Ateş

**Araştırmacı:**

Doç. Dr. Özgür Çakır

**Bursiyerler:**

Görkem Mutlu

Dr. Kivanç Uyanık

**Projeden desteklenmeyen diğer araştırmacılar:**

Çağlar Samaner

Serkan Paçal

Ocak 2022

ANKARA



Bilginin güvenli bir şekilde ve sadece ilgili kişiler arasında paylaşılması askeri uygulamalardan ticari sırlara kadar bir çok alanda çok önemli bir gereksinimdir. Bilgi güvenliğinde en önemli bileşen şifreleme için kullanılacak olan anahtarın üretilmesi ve ilgili kişiler arasında paylaşılmasıdır. Kuantum anahtar dağıtımı (KAD) kuantum mekaniğinin temel yasalarına dayalı güvenli bilgi teknolojileri kapsamında önerilmiş birçok uygulama arasında pratik kullanıma en yakın olanıdır.

Projenin konusu laboratuvar ortamında çalışan bir açık-hava kuantum anahtar dağıtımı sisteminin kurulmasıdır. Bu amaçla, fotonların polarizasyonuna bağlı B92 protokolü kullanıldı. KAD sistemlerinin en kritik bileşeni tek-foton kaynaklarıdır. Proje kapsamında altıgen Bor Nitrid (hBN) içerisinde bulunan kusur merkezleri tek-foton kaynağı olarak kullanıldı ve bu yapılar ile ilk defa KAD gösterimi yapıldı. Elde edilen sonuçlar, hBN kusur merkezlerinin kuantum teknolojileri alanında farklı bir çok uygulama için elverişli olduklarını göstermektedir.

Proje, CA15220: "Quantum Technologies in Space" başlıklı COST aksiyonu kapsamında TUBITAK tarafından desteklenmiştir.

Doç. Dr. Serkan Ateş



# İçindekiler

<b>ÖNSÖZ</b>	<b>i</b>
<b>ÖZET</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>ix</b>
<b>1. LİTERATÜR ÖZETİ</b>	<b>1</b>
<b>2. hBN KUSUR MERKEZLERİ ile AÇIK HAVA KAD</b>	<b>5</b>
2.1. Optik Karakterizasyon Yöntemleri . . . . .	5
2.1.1. Mikro-Fotoluminesans Spektroskopisi . . . . .	5
2.1.2. Zaman-Çözünümlü $\mu$ -PL ve Korelasyon Ölçümleri . . . . .	7
2.2. Kuantum Anahtar Dağıtımı . . . . .	9
2.2.1. BB84 Protokolü . . . . .	10
2.2.2. B92 Protokolü . . . . .	14
2.2.3. KAD Sisteminin Polarizasyon Analizi . . . . .	17
2.3. Zayıflatılmış Lazer ile KAD . . . . .	21
2.4. hBN Tek-foton Kaynağı ile KAD . . . . .	31
<b>3. TEK-FOTON MERTEBESİNDE EŞ-EVRE ÖLÇÜMÜ</b>	<b>37</b>
3.1. Michelson İnterferometresi Kurulumu . . . . .	37
3.2. Lazer ile Eş-evre Ölçümü . . . . .	39
<b>4. SONUÇ</b>	<b>43</b>



## Şekiller

1	Çok-katman ve (b) tek-katmanlı hBN kristal yapısı (c) Tek-katman, çok-katman, ve yığımsal hBN Raman spektrumları [(Tran vd., 2016a)] . . . . .	2
2	HBN içerisinde bulunan NBVN ve VN tip kusur merkezlerinin şematik hali ve enerji diyagramları [(Tran vd., 2016a)] . . . . .	3
3	3 HBN kusur merkezinden elde edilen PL spektrumu [(Tran vd., 2016a)] (b) Kusur merkezi kaynaklı sıfır-fonon çizgisi ve fonon yan bant geçişlerinin şematik gösterimi . . . . .	4
4	Proje süresince kullanılan mikro-fotoluminesans sisteminin şeması. Kullanılan lazerler: 532 nm Verdi V6 CW lazer, 633 nm HeNe CW lazer, 765 - 795 nm arası dalgaboyu ayarlanabilir CW lazer, 483 ve 633 nm darbeleri lazerler (darbe süresi 70 ps). . . . .	5
5	Proje kapsamında kullanılan optik laboratuvar. . . . .	6
6	(a) Zaman-çözünürlüklü $\mu$ -PL sisteminin örnek bir şeması. (b) 483 nm darbeleri lazer ile 80 MHz darbe frekasında alınmış örnek bir ışımaya ömrü ölçüm sonucu. . . . .	8
7	(a) Foton-korelasyon ölçümleri için kullanılan Hanbury-Brown ve Twiss (HBT) interferometresinin örnek bir şeması. (b) 25 MHz darbeleri lazer ile hBN içerisindeki kusur merkezlerinden alınmış örnek bir foton-korelasyon ölçümü sonucu. Gecikme zamanının 0 olduğu kısımdaki dip (anti-bunching) kusur merkezinin gerçek bir tek-foton yayıcısı olduğunu göstermektedir. . . . .	9
8	BB84 protokolü için polarizasyon değerlerine karşılık gelen bit değerlerinin gösterildiği örnek bir şema. Görselde beyaz bir ışık kaynağından gelen rastgele polarizasyonlardaki fotonlar Alice tarafından BB84 protokolüne uygun polarizasyonlara çevrilerek Bob tarafına gönderilmektedir. Bob ise köşegen ve ortogonal bazlarda rastgele ölçümler yapmaktadır. . . . .	11
9	BB84 protokolü ham-anahtar oluşumu. Alice rastgele bazlarda ve polarizasyonlarda seçtiği fotonları Bob'a gönderir, ve Bob gelen fotonları yine rastgele bazlarda ölçer. . . . .	12
10	BB84 protokolü elenen-anahtar oluşumu. Bob boş ölçümleri ve yanlış bazda yaptığı ölçümleri Alice ile "klasik" kanal üzerinden paylaştıktan sonra karşılıklı olarak bu ölçümler elenir ve elenen-anahtar oluşturulur. . . . .	13
11	İdeal bir KAD sisteminde, eleme işlemi yapıldıktan sonra Alice ve Bob tarafında kalan anahtarlar. . . . .	14



12	B92 protokolü için, polarizasyon değerlerine karşılık gelen bit değerlerinin gösterildiği örnek bir şema. Görselde beyaz bir ışık kaynağından gelen rastgele polarizasyonlardaki fotonlar Alice tarafından B92 protokolüne uygun polarizasyonlara çevrilerek Bob tarafına gönderilmektedir. Bob ise kalan iki polarizasyon değerinde rastgele olacak şekilde ölçümler yapmaktadır. . . . .	15
13	B92 protokolü ön-anahtar oluşumu. Alice seçilen 2 polarizasyon değerlerinde rastgele olacak şekilde fotonları Bob tarafına gönderir. Bob ise diğer iki polarizasyon değerinde rastgele olacak şekilde ölçümler yapar. Boş ölçümler hem ideal olmayan optik elemanlar ve dedektörlerden kaynaklı, hem de B92 protokolünden kaynaklıdır. . . . .	16
14	Boş ölçümlerin elediği durumda kalan anahtarlar. Bob tarafındaki sarı ölçümler deneysel hatalardan kaynaklı yanlış ölçümleri göstermektedir. . . . .	16
15	İdeal şartlarda, boş ölçümlerin elendiği durumda Alice'in ve Bob'un elinde kalan anahtarlar. . . . .	17
16	Dikey gelen fotonun EOM'den sonra ve ÇDP'dan sonraki polarizasyonunun teorik olarak gösterimi . . . . .	20
17	Dedektörlerde görülmesi beklenen gerilime bağlı polarizasyon durumları. . . . .	21
18	Proje dahilinde kurulumu yapılan B92 kuantum anahtar dağılımı düzeneği. Dikey polarizasyonda foton akışı sağlayan zayıflatılmış 787 nm darbeli lazer, bir fiber yardımı ile KAD düzeneğine gönderilir. Lazerden gelen fotonlar elektro-optik modülatörün içerisinden geçerken B92 protokolüne uygun polarizasyonlara çevrilerek Bob kısmına gönderilirler. Gelen fotonlar Bob kısmında bir 50/50 ışın ayırıcıdan geçerek polarizasyona bağlı ışın ayırıcılarda protokole uygun polarizasyon seçimleri yapılarak tek-foton dedektörlerine gönderilirler. Bir bilgisayar yardımı ile lazer, EOM ve dedektörlerde ölçülen fotonların senkronizasyonu yapılır. . . . .	22
19	B92 KAD protokolü sinyal gösterimleri. Darbeli sinyal üreticinde üretilen 2 dalga, kanal A ve kanal B üzerinden darbeli lazere ve EOM'e gitmek üzere Raspberry Pi işlemcisine gitmektedir. Raspberry Pi bilgisayarı, daha önceden belirlenmiş bir rastsal sayı serisi ile kanal B sinyallerini karşılaştırarak, 1 ise EOM'e düşük sinyal, 0 ise yüksek sinyal göndererek, kodlama işlemini gerçekleştirir. . . . .	23
20	EOM voltaj tarama ölçümleri. Modülatöre verilen voltaj değerlerine göre yatay ve 135 kollarında ölçülen ışık şiddeti değerleri . . . . .	25



- 21 Lazer darbeleri ile modülatör arasındaki zamansal senkronizasyonun kontrolü için hazırlanan sinyal şablonu ve ölçüm sonuçları. (Yukarı panel) Sinyal şablonu iki kısımdan oluşmakta ve kendini tekrar etmektedir. Lazer ilk kısımda, periyodu  $550 \mu s$  olan ( $50 \mu s$  yüksek -  $500 \mu s$  düşük sinyal olacak şekilde) 200 darbe atmaktadır. İkinci kısım ise 1 saniyelik düşük sinyali içermektedir. Modülatör ilk 100 darbe boyunca gelen fotonların polarizasyonlarını  $45$  dereceye, sonraki 100 darbe boyunca ise dikeye döndürmektedir. (a), (b), (c) ve (d) figürlerinin her biri, 200 lazer darbesi bölgesindeki  $135$  (üstte) ve yatay (ortada) kollarındaki dedektörlerden gelen sinyal zamanlarını ve bu sinyalleri oluşturan fotonların üretilme zamanlarını (altta) göstermektedir. Figürler,  $45$  ve dikey polarizasyonlarının kesişme noktasından gelen sinyallere giderek yakınlaştırılmaktadırlar. Turuncu ile işaretlenen bölgeler, bir sonraki figürde yakınlaştırılan alanları göstermektedir. . . . . 26
- 22 Farklı lazer güçlerinde,  $135$  (üstte) ve yatay (ortada) kollarından gelen dedektör sinyalleri ve bu sinyalleri oluşturan fotonların üretilme zamanları (altta). (a) ve (b) sırasıyla yüksek ve düşük lazer güçlerinde alınan ölçümleri göstermektedir. . . . . 27
- 23 Darbeli sinyal üretici tarafından lazeri sürmek için kullanılan tetikleme sinyalinin “ölçülen” periyodikliği (üstte) ve darbe aralığı (altta). Sinyal üretici,  $10$  kHz frekansında ( $100 \mu s$  periyod),  $0.5 \mu s$  darbe aralığında çalışmak üzere ayarlanmıştır. . . . . 28
- 24 Lazer tetikleme sinyali ile APD sinyalleri arasında geçen zamanın histogramları. Figürler lazer tetikleme sinyali ile yatay (üstte) ve  $135$  (altta) kollarında dedekte edilen sinyaller arasındaki geçikme zamanlarını göstermektedir. Sinyal üretici tarafından lazere gönderilen tetikleme sinyali ile, APD’lerde alınan ölçüm sinyalleri arasında yaklaşık  $130$  nanosaniyelik, elektronik geçikmelerden kaynaklı bir zaman farkı görülmektedir. . . . . 29
- 25 a) Işıma alınan bölgenin  $\mu PL$  haritası. Burada örneğin resmi, harita üzerine saydamlaştırılarak eklenmiştir. b) PL spektrumu ve polarizasyona bağlı ZPL-sıfır fonon çizgisi ışınması. PSB-fonon yan çizgisi, Si-Silikon alttaş raman sinyali. c) Lazerin gücüne bağlı ZPL foton sayıları. . . . . 32
- 26 (a) Aday kusur merkezinin filtrelenmiş ZPL ışınmasından elde edilen ışınma ömrü ve (b) foton-korelasyon ölçümleri. . . . . 33



27	Tek-foton kaynağı entegre edilmiş KAD sisteminin şeması. Darbeli lazer tek foton kaynağı sisteminin (SPS System) içerisinde yer almaktadır. Burada PG-darbe sinyali üretici, HVA-gerilim yükseltici, TTM-sayısal zaman kaydedici, EOM-elektro optik modülatör, P-polarizör, PBS-polarizasyonla bağlı ışın ayırıcı, BS-ışın ayırıcı, $\lambda/2$ -yarım dalga-plakası, $\lambda/4$ -çeyrek dalga-plakası ve APD-tek-foton dedektörü anlamına gelmektedirler. . . . .	34
28	İş paketi kapsamında kurulan B92 düzeneği. Bu aşamada foton kaynağı olarak 633 nm dalga boyunda darbeli lazer kullanılmıştır . . . . .	35
29	Oluşturulan anahtar kullanılarak şifrelenmiş (ortada) ve Bob tarafından açılmış (sağda) olan resim (solda). . . . .	36
30	Proje kapsamında kurulumu yapılan Michelson interferometresinin şematik gösterimi. İnterferometrenin bir kolunda kaba hareketleri sağlamak için step-motorlu hareket sehпасı, diğer kolunda ise hassas hareketleri sağlamak için piezo-elektrik motor bulunan hareket sehпасı bulunmaktadır. . . . .	38
31	Kurulumu yapılan Michelson interferometresinin mevcut hali. . . . .	38
32	Michelson interferometresinin otomatize edilebilmesi için geliştirilen Labview arayüzü. . . . .	39
33	Örnek olarak seçilen a) $\Delta x = 0$ mm, b) $\Delta x = 72$ mm, c) $\Delta x = 144$ mm, ve d) $\Delta x = 236$ mm yol farklarındaki görünürlük ölçümleri. . . . .	40
34	780 nm lazer ile alınan görünürlük ölçümleri. Kırmızı ile gösterilen çizgi, 8'deki Gaussian fonksiyonun fit edilmesi ile elde edilmiştir. . . . .	41



## Tablolar

1	Tekrarlanan ve rastsal bit serileri kullanılarak 10 kHz darbe frekansında gerçekleştirilen kuantum anahtar dağıtımı sonuçları. Saniye başına bit üretimi, birim saniyede eşleşen bit sayısı ile verilmektedir. Kuantum bit hata oranı, eşleşen bit sayısının, tekli sinyal sayısına oranı ile hesaplanır. . . . .	30
2	1 MHz darbe frekansında zayıflatılmış lazer ile alınan KAD sonuçları. . . . .	31



Kuantum anahtar dağıtımı (KAD) kuantum mekaniğinin temel yasalarına dayalı güvenli bilgi teknolojileri kapsamında önerilmiş birçok uygulama arasında pratik kullanıma en yakın olanıdır. KAD iki kullanıcı arasında güvenli bilgi paylaşımı için kullanılan anahtarın üretilmesini ve dağıtılmasını sağlar. KAD sistemlerinin çalışma prensibinin ve sağladığı güvenliğin temelinde anahtarın tek fotonlar üzerinden kullanıcılar arasında dağıtılması vardır. Bu sebeple, verimli tek foton kaynakları KAD sistemleri için kritik öneme sahiptir. Literatürde farklı tek-foton kaynakları ile KAD gösterimleri mevcuttur ancak elde edilen anahtar üretim oranları ve güvenlik seviyeleri tek-foton kaynaklarının performanslarından kaynaklanan sebeplerle istenilen değerlere ulaşamamıştır. Bu sebeple, özellikle oda sıcaklığında ışılan verimli tek-foton kaynaklarına yönelik araştırmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir.

Bu projede alternatif olarak son zamanlarda popüler olan altigen bor nitrür (hBN) içerisindeki kusur merkezleri KAD için tek-foton kaynağı olarak çalışıldı. HBN bilinen diğer iki boyutlu malzemelerden farklı olarak sahip olduğu geniş bant aralığı sayesinde ( 5.5 eV) farklı enerji değerlerine sahip kusur merkezleri barındırır. Böylece, mor-ötesinden görünür bölgeye kadar olan geniş bir spektrumda tek-foton ışınması elde edilebilir. Ayrıca, hBN kusur merkezlerinden elde edilen tek-foton ışınmasını 800 K gibi çok yüksek sıcaklıklarda da gözlemlemek mümkündür. Bütün bu özellikleri nedeniyle hBN malzemesinin kuantum bilgi teknolojileri, metroloji ve sensör teknolojileri gibi farklı alanlarda ve farklı ortam koşullarında kullanılabilmesi düşünülmektedir. Bu proje kapsamında hBN içerisindeki kusur merkezlerinden elde edilen sıfır-fonon çizgisi (ZPL) ışınmasının kuantum optik özelliklerinin incelendi ve bu yapılar ile ilk defa B92 protokolüne dayalı açık-hava KAD gösterimi yapıldı.

**Anahtar kelimeler:** Tek-foton Kaynakları, Kuantum Kriptoloji, Kuantum Anahtar Dağıtımı, Deneysel Kuantum Optiği.



## ABSTRACT

Quantum key distribution (QKD) is the closest to practical use among the many applications proposed within the scope of secure information technologies based on the fundamental principles of quantum mechanics. QKD provides the generation and distribution of the secure key to be used between two parties. The basis of the fundamental working principle of QKD systems and the security they provide is the distribution of the secure key among users with single-photons. For this reason, efficient single photon sources are crucial for QKD systems. There are various single-photon sources and QKD systems in the literature, but the obtained key generation rates and security levels could not reach the desired values due to the performances of the single-photon sources. For this reason, studies on efficient single-photon sources emitting at room temperatures continue intensively. As an alternative, defect centers in the hexagonal boron nitride (hBN) were studied as a single-photon source for QKD in the project.

Unlike other two-dimensional materials, hBN contains defect centers with different energy values due to its wide ( 5.5 eV) band gap. Thus, single-photon emission can be obtained in a broad spectrum from the ultraviolet to the visible region. It is also possible to observe the single-photon emission from hBN defects at very high temperatures, such as 800 K. Due to all these properties, it is thought that hBN can be used in different fields such as quantum information technologies, metrology and sensor technologies and in different environmental conditions. In this project, the fundamental quantum optical properties of zero-phonon line (ZPL) emission from defects in hBN are investigated and a B92 based QKD with these emitters is shown for the first time.

**Keywords:** Single-Photon Sources, Quantum cryptology, Quantum Key Distribution, Experimental Quantum Optics.



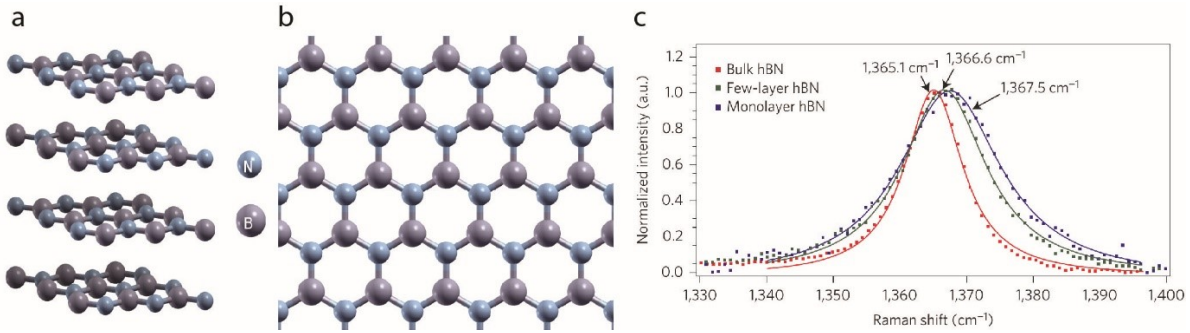
TÜBİTAK

## 1. LİTERATÜR ÖZETİ

Fotonlar birbirleriyle ve buldukları ortamla olan zayıf etkileşimlerinden dolayı üzerlerine kodlanmış olan bilginin uzun mesafelere taşınmasına olanak sağlayan ideal bir platform olarak kabul edilirler. Tek-foton kaynakları kuantum kriptoloji [(Gisin vd., 2002)] ve kuantum hesaplama [(Ladd vd., 2010)] gibi kuantum enformasyon teknolojileri [(O'Brien vd., 2009)] alanındaki uygulamalar için önemli önkoşullardandır. Özellikle KAD halihazırdaki teknoloji ile gerçekleştirilebilen bir teknoloji olarak bilinmektedir. Bilinen ilk KAD protokolü, 1984 yılında Bennett ve Brassard tarafından önerilmiş ve BB84 olarak literatüre geçmiştir [(Bennett & Brassard, 1984)]. Burada anahtar bitleri tamamen rastsal olarak farklı polarizasyon durumlarında hazırlanmış olan tek fotonlar kullanılarak dağıtılır. İlk defa 1992 de IBM laboratuvarlarında 32 cm için gerçekleştirilmiş olan BB84 protokolü [(Bennett, 1992)], 2007 yılında 144 km mesafeye ulaşılmış [(Schmitt-Manderbach vd., 2007)], 2013 yılında ise yer ve hava istasyonları kullanılarak iki nokta arasında açık hava üzerinden anahtar dağıtımını gösterilmiştir [(Nauerth vd., 2013)]. Ancak bahsedilen bütün çalışmalarda tek-foton kaynağı yerine zayıflatılmış lazer atımları kullanılmıştır. KAD sistemlerinde zayıflatılmış lazer yerine gerçek tek-foton kaynaklarının kullanılması özellikle güvenlik ve anahtar üretim oranlarının iyileştirilmesi açısından kritiktir. Bu uygulamalar için gerçekleştirilen birçok kuantum optiği deneylerinde tek-foton kaynağı olarak atom-gibi sistemler olarak adlandırılan (atomlar ve iyonlar ek olarak) yarıiletken kuantum noktalar [(Michler vd., 2000; Lodahl vd., 2015; Shields, 2007)], tek moleküller [(Basché vd., 1992; Kiraz vd., 2005)], ve elmas kristalindeki nitrojen boşluğu merkezleri (NV centers) [(Kurtsiefer vd., 2000)] kullanılmıştır. Özellikle, son yıllarda geniş bant aralığına sahip üç boyutlu malzemeler (elmas, silisyum karbür, çinko oksit) içerisinde bulunan izole renk/kusur merkezleri bahsedilen uygulamalar için tek-foton kaynağı olarak büyük ilgi çekmektedir [(Weber vd., 2010; Dutt vd., 2007; Chu, 2015; Aharonovich & Neu, 2014)].

Bunlara ek olarak, bir süredir yarıiletken geçiş metali kalkojenleri (TMDC) [(Tonndorf vd., 2015; Koperski vd., 2015; He vd., 2015; Srivastava vd., 2015a,b)] ile altıgen örgüye sahip bor nitrür (hBN) [(Tran vd., 2016a)] malzemesindeki kusur merkezleri kullanılarak görünür bölgede verimli tek-foton üretimi üzerine çalışmalar yürütülmektedir. Bu tür iki boyutlu malzemeler sahip oldukları üstün optik, elektronik, mekanik ve termal özelliklerinden dolayı birçok opto-elektronik uygulamalar için elverişlidirler [(Mak & Shan, 2016; Duan vd., 2015; Levendorf vd., 2012; Castellanos-Gomez, 2016)]. Yarıiletken TMDC malzemeler (örneğin MoS<sub>2</sub>, MoSe<sub>2</sub>, WS<sub>2</sub> ve WSe<sub>2</sub>) çok katmanlı yapıda olduklarında endirekt bant yapısına sahip oldukları halde, tek katmana indirgendiklerinde direkt bant yapısına geçerek optik ışımaya gösterebilmektedirler. Buna ek olarak, tek-katmanlı WSe<sub>2</sub> film üzerindeki kenar kusurlarda hapsolan eksitonlar krayojenik sıcaklıklarda kuantum noktalar gibi yüksek spektral stabiliteye sahip tek-foton mertebesinde ışımaktadırlar.

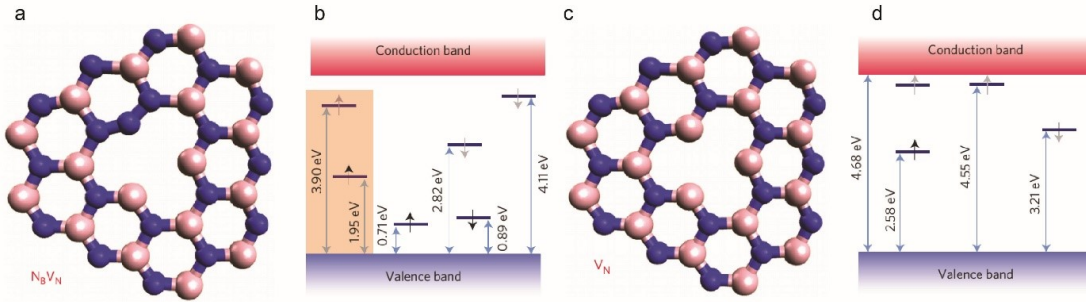
TMDC malzemeler gibi bir diğer iki boyutlu van der Waals kristali olan hBN ise, yaklaşık 6eV bant aralığına sahip bir indirekt yarı-iletkenidir [(Cassabois vd., 2016)]. Şekil-1'de görüldüğü üzere, bor ve nitrojen atomlarından oluşan hBN, grafen benzeri bir petek örgü yapısındadır. hBN kristali genellikle CVD tekniği ile epitaksiyel olarak bakır üzerine büyütülür, ancak daha sonra optik kontrast kazanmak için silikon üzerine değişik tekniklerle aktarılarak optik karakterizasyon için kullanılabilir hale getirilir. Şekil-1c, silikon alt-taş üzerine taşınmış tek-katman, çok-katman ve yığılmsal hBN malzemelerden alınmış karakteristik Raman spektrumlarını göstermektedir. Görüldüğü üzere yaklaşık  $12 \text{ cm}^{-1}$  genişliğe sahip  $E_{2g}$  in-plane titreşim kipine ait Raman kaymaları  $1366 \text{ cm}^{-1}$  civarındadır [(Tran vd., 2016a)]. Yüksek enerjili bir lazer ile uyarılması durumunda sahip olduğu geniş bant aralığından dolayı hBN oda sıcaklığında yaklaşık 200 nm civarında bir ışımaya gösterir. Morötesi bölgede olan bu ışımaya tıbbi uygulamalardan bilgi depolama teknolojilerine kadar değişik uygulamalar için uygundur [(Kubota vd., 2007)].



**Şekil 1:** Çok-katman ve (b) tek-katmanlı hBN kristal yapısı (c) Tek-katman, çok-katman, ve yığılmsal hBN Raman spektrumları [(Tran vd., 2016a)]

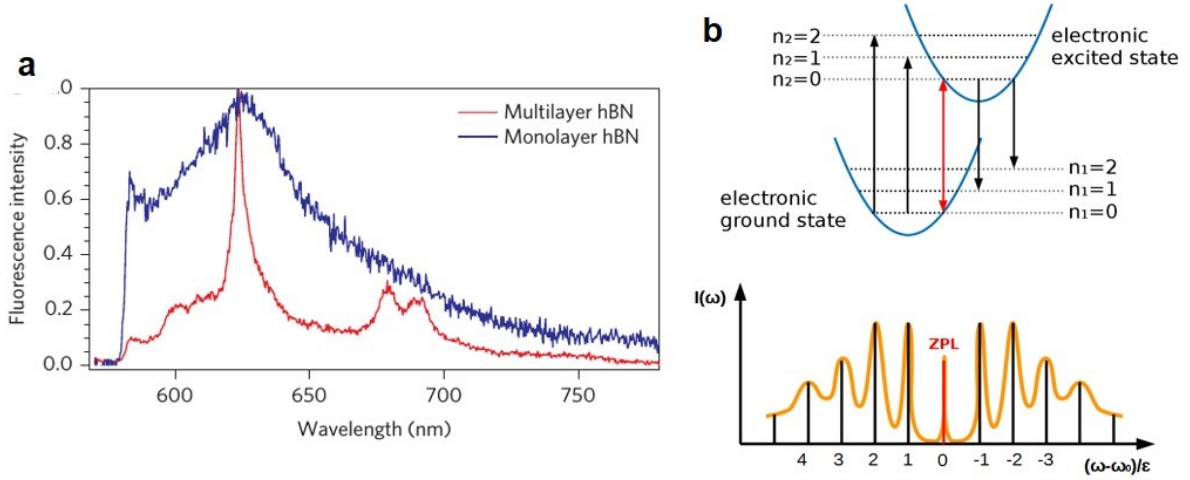
Yeni yapılan çalışmalarda raporlandığı üzere, bilinen diğer geniş bant aralığına sahip silisyum karbür (SiC) [(Castelletto vd., 2013; Boretti & Rosa, 2016; Weber vd., 2011; Koehl vd., 2011; Fuchs vd., 2015; Lienhard vd., 2016)], elmas [(Kurtsiefer vd., 2000; Aharonovich & Neu, 2014; Doherty vd., 2013; Neu vd., 2013)] ve çinko oksit (ZnO) [(Jungwirth vd., 2016; Neitzke vd., 2015)] gibi malzemelerde olduğu gibi hBN içerisinde de enerji seviyesi geniş bant aralığı içerisinde olan farklı optik-aktif kusur merkezleri bulunabilmektedir. Bu merkezler elmas kristalindeki nitrojen boşluğu merkezleri (NV centers) [(Doherty vd., 2013)] veya silikon boşluğu merkezleri (SiV) [(Neu vd., 2013)] gibi kesikli enerji seviyelerine sahiptirler ve oda sıcaklığında çalışan stabil ve verimli tek-foton kaynağı olarak kullanılabilirler. Şekil-2, hBN kristali içerisinde oluşturulmuş (a) nitrojen-boşluğu yanında komşu bir bor atomu yerine nitrojen bağlanmış bir kusur (NBVN) ile (c) nitrojen-boşluğu (VN) kusurunu göstermektedir. Oluşan bu kusur merkezlerinin kesikli enerji seviyelerine ait hesaplamalar Şekil-2(b) ve (d) ile gösterilmiştir. Bahsedilen kusurlar uyarılmaları (sub-bandgap

excitation) durumunda, enerji seviyelerine denk gelen spektral aralıkta ışıklar [(Tran vd., 2016a)].



**Şekil 2:** HBN içerisinde bulunan NBVN ve VN tip kusur merkezlerinin şematik hali ve enerji diyagramları [(Tran vd., 2016a)]

HBN'in diğer iki boyutlu TMDC malzemelere kıyasla önemli avantajları mevcuttur. Öncelikle, bu malzeme içerisindeki kusur merkezlerinden elde edilen ışımının kuantum doğası (tek-foton mertebesinde ışım) TMDC'lerde olduğu gibi sadece krayojenik sıcaklıklarla sınırlı kalmayıp 800K'lere kadar korunabilmektedir [(Kianinia vd., 2017)]. Bu özelliklerine ek olarak geniş bant aralığına sahip oldukları için barındırdıkları kusur merkezlerinden gelen ışım elektromanyetik tayf içerisinde çok geniş bir alana yayılabilmektedir (Mor ötesinden [(Bourrellier vd., 2016)] görünür bölgeye [(Tran vd., 2016a; Jungwirth vd., 2016; Chejanovsky vd., 2016, 2017; Tran vd., 2016b, 2017)]). Son olarak, hBN örnekler yığınsal tek-kristal [(Martínez vd., 2016)], toz, ve CVD ile büyütülen tek-katman/çok-katman [(Chejanovsky vd., 2016)] gibi farklı formlarda bulunabilmektedirler. Bütün bu özellikleri,



**Şekil 3:** 3 HBN kusur merkezinden elde edilen PL spektrumu [(Tran vd., 2016a)] (b) Kusur merkezi kaynaklı sıfır-fonon çizgisi ve fonon yan bant geçişlerinin şematik gösterimi

hBN'in farklı koşullarda çalışabilecek opto-elektronik ve kuantum teknolojilerindeki birçok uygulamaya uygun bir ışık kaynağı olduğunu düşündürmektedir.

Değişik sistemlerden elde edilebilen tek-foton mertebesindeki ışımaların uygulamalarından bir tanesi yukarıda bahsedildiği üzere KAD olarak bilinmektedir. Literatürde şimdiye kadar raporlanmış KAD gösterimleri için zayıflatılmış lazer atımları (WCP) [(Schmitt-Manderbach vd., 2007)], kuantum noktalar [(Rau vd., 2014)] ve elmas içerisinde bulunan farklı kusur merkezlerinden elde edilen ZPL ışımaları kullanılmıştır [(Leifgen vd., 2014)]. Ancak bu sistemlerden elde edilen fotonlar ya tek-foton kaynağı değildir (WCP), ya krayojenik sıcaklıklar gerektirmektedir (kuantum noktalar), ya da toplam ışımadaki ZPL oranları çok düşük olduklarından filtrelenmiş dalgaboyundaki tek-foton oranları sınırlıdır (elmas içerisindeki kusur merkezleri). KAD uygulamasında elde edilecek olan anahtar üretim oranları kullanılan ışık kaynaklarından toplanabilen tek-foton oranı ile belirlenmektedir. Bu sebeple, yüksek anahtar üretim oranı elde etmeye yönelik alternatif parlak tek-foton kaynağı arayışları aktif bir şekilde sürmektedir. Bu proje kapsamında hBN yapılarından elde edilecek tek-foton doğasındaki ZPL ışınması ile açık-hava KAD gösterimi üzerine yapılan çalışmalar paylaşılacaktır.

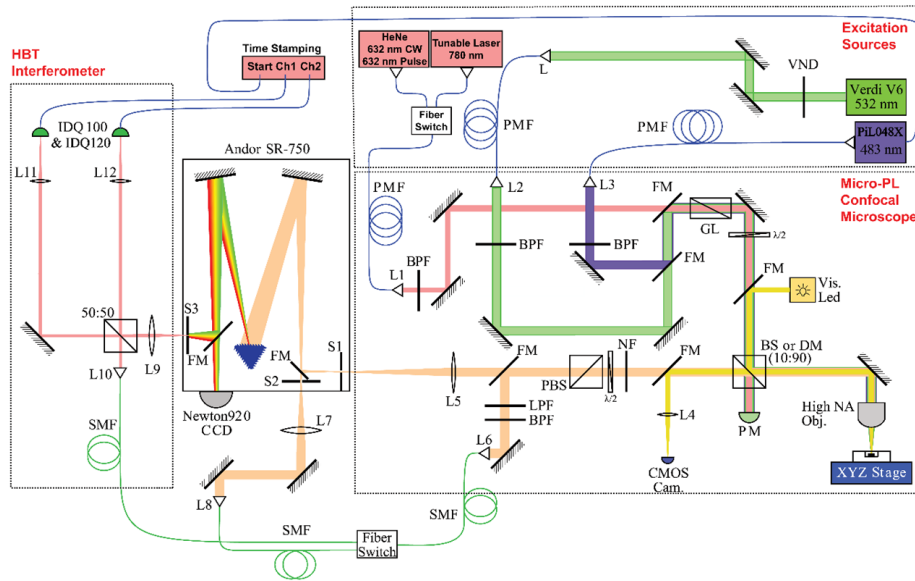
## 2. hBN KUSUR MERKEZLERİ ile AÇIK HAVA KAD

### 2.1. Optik Karakterizasyon Yöntemleri

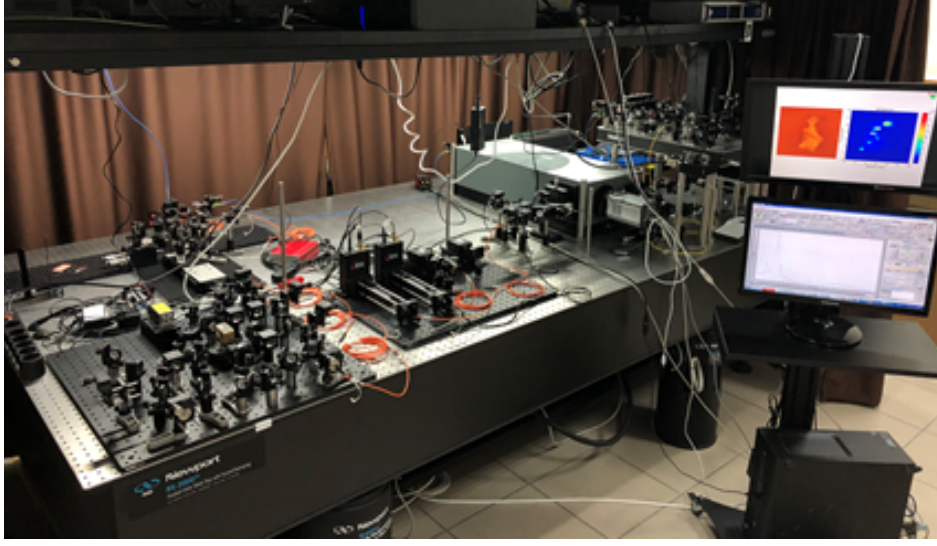
Proje içerisinde özellikle kuantum anahtar dağıtımı için aranan uygun hBN kusur merkezlerinin optik karakterizasyonları Raman Spektroskopisi (RS), mikro-Fotoluminesans ( $\mu$ -PL) Spektroskopisi, zaman çözünürlüklü  $\mu$ -PL spektroskopisi, foton-korelasyon ölçümleri, ve eş-evre ölçümleri gibi birçok optik yöntemin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu kısımda yukarıda belirtilen optik yöntemlerin uygulanması için kurulan veya hali hazırda mevcut olan optik düzenekler incelenerek, kullanılan ölçüm yöntemleri hakkında temel bilgiler verilmektedir.

#### 2.1.1. Mikro-Fotoluminesans Spektroskopisi

Şekil-4 proje süresince kullanılan konfokal optik mikroskop düzenekinin şemasını ve Şekil-5 bu sistemin laboratuvarımızda kurulu halini göstermektedir. Bu düzenek ile yığımsal hBN örneklerinin optik olarak görüntülenmesi, farklı dalga boylarında (sürekli ve darbeli) lazerler ile uyarılması ve spektral/temporal özelliklerinin incelenmesi ile foton-korelasyon ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 4: Proje süresince kullanılan mikro-fotoluminesans sisteminin şeması. Kullanılan lazerler: 532 nm Verdi V6 CW lazer, 633 nm HeNe CW lazer, 765 - 795 nm arası dalgaboyu ayarlanabilir CW lazer, 483 ve 633 nm darbeli lazerler (darbe süresi 70 ps).



Şekil 5: Proje kapsamında kullanılan optik laboratuvar.

Şekil-4'teki düzenek sağda optik uyarım, mikroskop sistemi, örnek kısmı ve solda ölçüm kısmı olarak bölümlere ayrılmıştır, ve bu kısımlarda bulunan enstrümanlara ait temel bilgiler ve alınan ölçümler aşağıda sırasıyla verilmektedir.

#### a) Optik uyarım

Bu kısımda hBN örneklerin optik olarak uyarılması için 532 nm ve 633 nm dalga boyundaki sürekli-dalga lazerler, 483 nm ve 633 nm dalga boyundaki darbeli lazerler, ve 765-795 arası dalga boyu ayarlanabilir sürekli-dalga lazer bulunmaktadır. Bütün lazerler optik güçleri kontrol edilerek polarizasyon korunumlu bir fibere bağlanmıştır. Fiberlerin diğer kısmı ise mikroskop sistemine eşleniktir.

#### b) Mikroskop sistemi

Bu kısımda fiberden gelen lazerin önce polarizasyonu bir polarizör ve yarım dalga plaka ile kontrol edilir. Ardından 10/90 (reflection/transmission) oranına sahip bir ışın ayırıcı ile örneğe giden optik uyarım gücü ölçülür. Bu ışın ayırıcının diğer portu da örnek konumunun belirlenmesi için gerekli olan aydınlatma (beyaz ışık) için kullanılır. Konfokal geometriye sahip olan mikroskop sisteminde hareketli aynalar ile gerektiğinde beyaz ışık objektiften örneğe ve kameraya gönderilerek malzemenin konumu aktif bir şekilde görüntülenebilmektedir. Işın ayırıcıdan geçen lazer yüksek sayısal açıklığa sahip bir mikroskop objektifine ( $>0.75$ ) yönlendirilir. Aynı mikroskop objektifi örnekten gelen ışıyla birlikte örnek üzerinde saçılmış olan lazerin bir kısmını da toplamaktadır. Bu sebeple, kullanılan lazere bağlı olarak notch filtreler ( $OD>6$ ) kullanılarak lazer tamamen filtrelenir.



Ardından, ışımamın polarizasyon analizi için bir yarım-dalga plaka ve polarizasyona bağlı ışın ayırıcı kullanılır. Son olarak, toplanan ışıma ölçüm amacına göre tek-kipli fiberle eşlenerek değişik ölçüm kısımlarına aktarılır.

#### c) Örnek kısmı

Bu kısımda örnek üzerindeki farklı kusur merkezlerinin verimli bir şekilde uyarılabilmesi için yüksek hassasiyete sahip ( 100 nm) XYZ taramalı hareket sehпасı kullanılmaktadır.

#### d) Ölçüm kısmı

Optik düzeneğin bu kısmı fiberle bağlaşıק olan hBN ışımamının spektral ve temporal analizleri için gerekli olan yine fiber-bağlaşıק sistemleri içermektedir. Spektral ölçümlerle ilgili detaylar aşağıda verilmektedir.

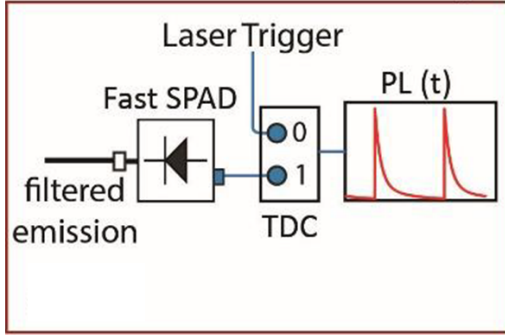
### Raman ve $\mu$ -PL Spektroskopisi

hBN örnekler içerisinde bulunan kusur merkezlerinin temel optik karakterizasyonları için Raman ve PL ölçümleri yapılır. Bu amaçla, örnekten toplanan ışıma bir spektrometreye yönlendirilir ve spektral analiz için bir CCD kamera kullanılır. Sistemin spektral çözünürlüğü yaklaşık olarak 120  $\mu$ m mertebesindedir. Spektrometrenin diğer çıkış portu ise kusur merkezlerinden elde edilen ışımayla yapılacak foton korelasyon ölçümleri için spektral filtreleme amacıyla kullanılmaktadır.

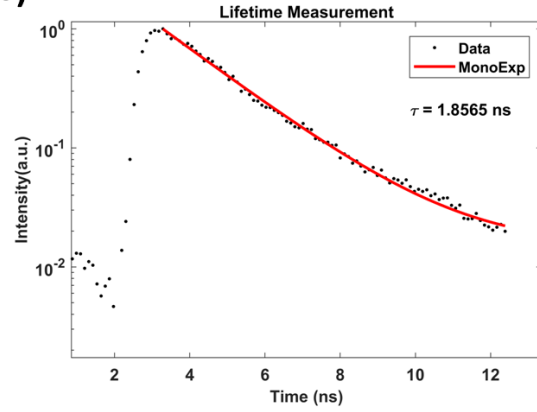
#### 2.1.2. Zaman-Çözünümlü $\mu$ -PL ve Korelasyon Ölçümleri

hBN kusur merkezlerinden elde edilen ışımamın KAD sistemine entegre edildiğı taktide ne kadar verimli çalışabileceğini öngörebilmek adına, ışıma dinamiğı ve kaynağın gerçek bir tek-foton kaynağına olan yakınlığı test edilmelidir. Kaynağın ışıma ömrü, üretilecek anahtar için birim zamandaki bit sayısını doğrudan etkilemektedir. Deneysel enstrümanlardan kaynaklı sınırların olmadığı ideal durumlarda, ışıma ömrü ne kadar kısa ise, birim zamanda elde edilebilecek bit miktarı o kadar fazla olacaktır. Kaynağın gerçek bir tek foton dedektörüne yakınlığı ise hem KAD sisteminin güvenliğini, hem de farklı polarizasyonlardan kaynaklanabilecek hataları azaltmaktadır.

a) Time-Resolved PL setup

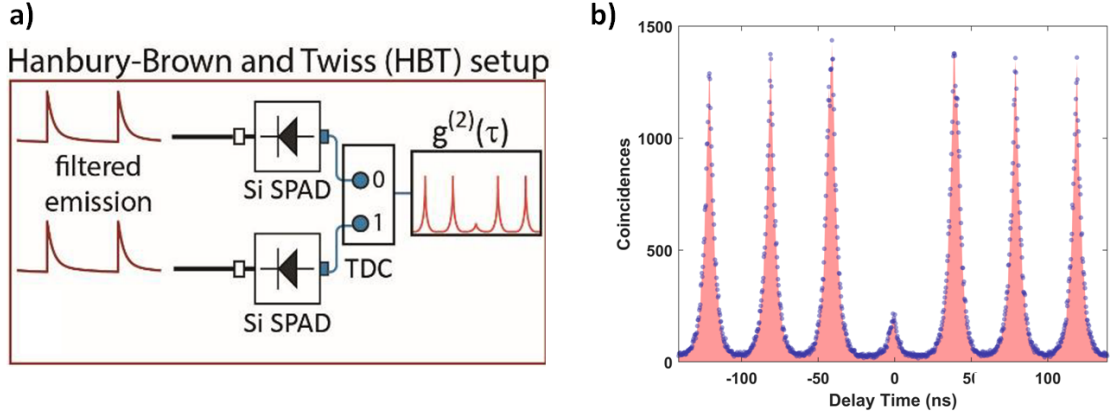


b)



Şekil 6: (a) Zaman-çözünürlüklü  $\mu$ -PL sisteminin örnek bir şeması. (b) 483 nm darbeli lazer ile 80 MHz darbe frekasında alınmış örnek bir ışınma ömrü ölçüm sonucu.

HBN kusur merkezlerinden elde edilen olan sıfır-fonon çizgisinin ışınma ömrünün (lifetime) deneysel gösterimi için zaman korelasyonlu tek-foton sayma (time-correlated single photon counting, TC-SPC) tekniği kullanılır. Şekil-6(a) ve (b)'de örnek bir zaman-çözünümlü  $\mu$ -PL sistemi ve böyle bir sistem ile alınan örnek bir ışınma ömrü ölçümü gösterilmektedir. Kusur merkezlerinin uyarımı için darbeli bir lazer kullanılır ve her bir lazer darbesi başlangıç sinyalini (şekilde 0 olarak gösterilen) temsil eder. Bitiş sinyali ise (şekilde 1 olarak gösterilen), lazer ile uyarılan kusur merkezinden gelen ışınmanın optik elemanlardan geçtikten sonra APDde ölçülme sinyalidir. Böylelikle başlangıç ve bitiş sinyalleri arasındaki farkın histogramından, elektronun uyarılmış seviyede kalma süresi yani ışınma ömrü hesaplanır. Dikkat edilmesi gereken bir nokta kullanılan lazerlerin darbe süresinin (pulse width), ölçülmesi beklenen ışınma ömürlerinden çok daha kısa olması gerektiğidir, bu sayede her bir lazer darbesinde sadece bir kez uyarılma sağlanmış olur. Mevcut düzeneklerde kullanılan darbeli lazerlerin darbe genişliği 70 ps mertebesinde olup hBN kusur merkezleri için literatürden bilinen yaklaşık 1-3 nanosaniye ışınma ömrü aralığının çok altında olmaktadır. Kullanılan tek-foton dedektörüne bağlı olarak mevcut sistemin zaman hassasiyeti 100 ps ile 400 ps arasında değişmektedir.



**Şekil 7:** (a) Foton-korelasyon ölçümleri için kullanılan Hanbury-Brown ve Twiss (HBT) interferometresinin örnek bir şeması. (b) 25 MHz darbeli lazer ile hBN içerisindeki kusur merkezlerinden alınmış örnek bir foton-korelasyon ölçümü sonucu. Gecikme zamanının 0 olduğu kısımdaki dip (anti-bunching) kusur merkezinin gerçek bir tek-foton yayıcısı olduğunu göstermektedir.

Kaynağın gerçek bir tek-foton ışığı yayıcısı olduğu ise Hanbury-Brown ve Twiss (HBT) interferometresi ile alınan ikinci mertebeye foton korelasyon ölçümü ile gösterilir. **Şekil-7** örnek bir HBT sisteminin şemasını ve darbeli lazer ile bu sistemden alınan korelasyon ölçüm sonucunu göstermektedir. Işık kaynağından gelen sinyal spektral olarak filtrelenir ve bir 50/50 ışın ayırıcı yardımı ile ikiye ayrılarak korelasyon ölçümü yapılmak üzere tek-foton dedektörlerine gönderilir. Dedektörlerden bir tanesi başlangıç sinyalini (figürde 0 olarak gösterilen) diğeri ise bitiş sinyalini (figürde 1 olarak gösterilen) verecek şekilde, her bir başlangıç ile bitiş sinyali arasındaki zaman farklarının histogramı çizdirilir. Eğer kaynak gerçek bir tek-foton ışığı yayıcısı ise, 50/50 ışın ayırıcıya gelen tek fotonlar, ya bir APD'ye ya da diğere gideceği için, zaman farkı 0'a yaklaştıkça histogramda ki girdi sayısında 0'a doğru bir dip (anti-bunching dip) yapar. Proje kapsamında kusur merkezlerinin dalga boyuna, ve yapılacak ölçümlerin zaman hassasiyetine bağlı olarak farklı APD'lerin bulunduğu (IDQuantique firmasından tedarik edilmiş ID120 ve ID100) iki ayrı HBT interferometresi kullanılmıştır.

## 2.2. Kuantum Anahtar Dağıtımı

Kuantum anahtar dağıtımı karşılıklı olarak şifreli bilgi paylaşımı yapmak isteyen iki tarafın (çoğunlukla Alice ve Bob olarak isimlendirilen), bilginin şifrelenmesi ve deşifre edilmesi kısmında kullanılacak olan anahtarın iki tarafta güvenli bir şekilde oluşturulmasını kapsamaktadır. Anahtarın güvenliği kullanılan sistemlerin teknik özelliklerinden ziyade, dalga fonksiyonunun çökmesi, belirsizlik prensibi, ve bilginin klonlanamaması (no-cloning theorem) gibi temel kuantum prensiplerine



dayanmaktadır. Literatürde KAD başlığı altında aynı temellere dayalı fakat bunlara ek olarak, pratikteki uygulanabilirliği, sistemin kurulma maaliyeti, ve sağlayabileceği ekstra güvenlik unsurları gibi özellikler açısından farklılık gösteren birçok protokol bulunmaktadır.

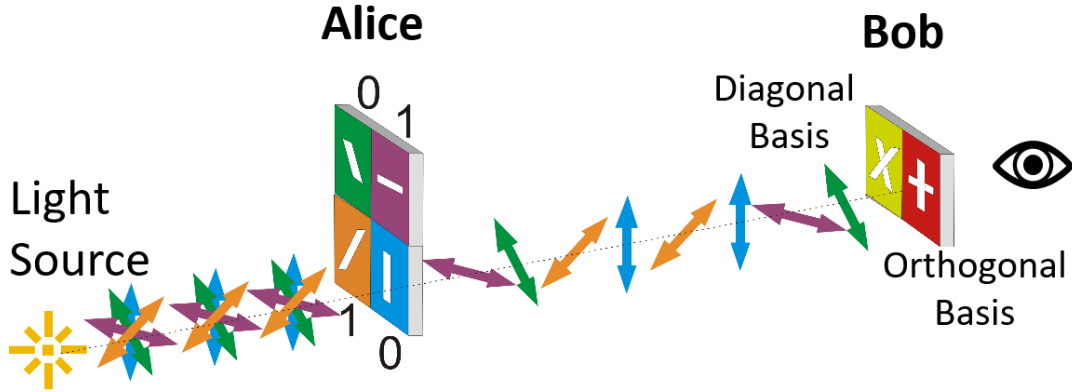
Şifreli haberleşme süreci, temelde üç aşamada gerçekleşmektedir: Gönderilmek istenen bilginin (Alice tarafından) anahtar ile şifrelenmesi, şifrelenen bilginin güvenli bir kanal üzerinden paylaşılması, ve şifreli bilginin (Bob tarafından) aynı anahtar tarafından deşifre edilmesi. Kuantum anahtar dağıtımının amacı şifreleme ve deşifre için kullanılacak anahtarın iki taraf arasında güvenli bir şekilde dağıtılmasını sağlamaktadır ve anahtarın oluşumu süreci tarafların karşılıklı olarak iki kanal üzerinden haberleşmesini gerektirmektedir. Kuantum kanalı, anahtarın oluşumu için kullanılan temel kuantum bilgi bileşenlerinin yani kubitlerin (kuantum bit) gönderildiği kanaldır ve bu kanalın tamamen güvenli olması gerekmektedir. İleri kısımlarda bahsedileceği üzere, KAD protokolleri kuantum kanalının güvenliğini direk olarak garantilemektedir. Klasik kanal ise, karşılıklı anahtar oluşumu için protokol gereği bazı bilgilerin paylaşılacağı halka açık bir kanaldır. Klasik kanal içerisinde Alice ve Bob arasında paylaşılacak bilgiler, üçüncü taraflar tarafından dinlenebilir fakat tek başına bu bilgiler hiçbir şekilde anahtarın güvenliğini tehlikeye atmazlar.

Kubitler için yaygın olarak fotonlar kullanılmaktadır ve kuantum anahtarı fotonların polarizasyonu üzerine kodlanır. Kaynaktan gelen fotonların polarizasyonları üzerine Alice tarafından çeşitli optik ve opto-elektronik bileşenler yardımıyla anahtar kodlaması yapılır ve kuantum kanalı üzerinden Bob'a gönderilir. Gönderilen fotonlar, yine çeşitli optik ve opto-elektronik bileşenlerin bulunduğu protokole uygun olarak hazırlanmış bir düzenek içerisinde geçerek tek-foton dedektörlerinde dedekte edilir. Alice ve Bob'un optik düzenekleri protokolden protokole farklılıklar gösterebilirken, aralarındaki zaman senkronizasyonu her protokol için ortak bir öneme sahiptir. Son olarak klasik kanal aracılığıyla karşılaştırmalar yapılarak anahtar oluşumu gerçekleştirilir.

Bu kısımda, tarihsel olarak önerilen ilk KAD protokolü olan BB84 protokolü ve teknik açıdan buna çok benzer B92 protokolü hakkında temel bilgiler verilerek prosedürel bir şekilde adım adım anlatılmaktadır. Protokollerin hem daha iyi anlaşılabilmesi, hem de deneysel düzenekler ile ilişkilendirilebilmesi için optik düzenekler ile birlikte gösterilmektedir. Son olarak kodlamayı yapan optik bileşenlerin davranışı hakkında temel bilgiler verilerek, Jones Cebiri ile matematiksel yapıları gösterilecektir.

### **2.2.1. BB84 Protokolü**

BB84 protokolü tarihsel olarak önerilen ilk kuantum anahtar dağıtım protokolüdür, ve hem protokolden kaynaklı teknik özellikleri (birim zamanda üretilen anahtar miktarı, güvenliği vs) hem de pratik olarak uygulanabilirliği bakımından bilimsel araştırmalarda sıkça kullanılmaktadır. Hem

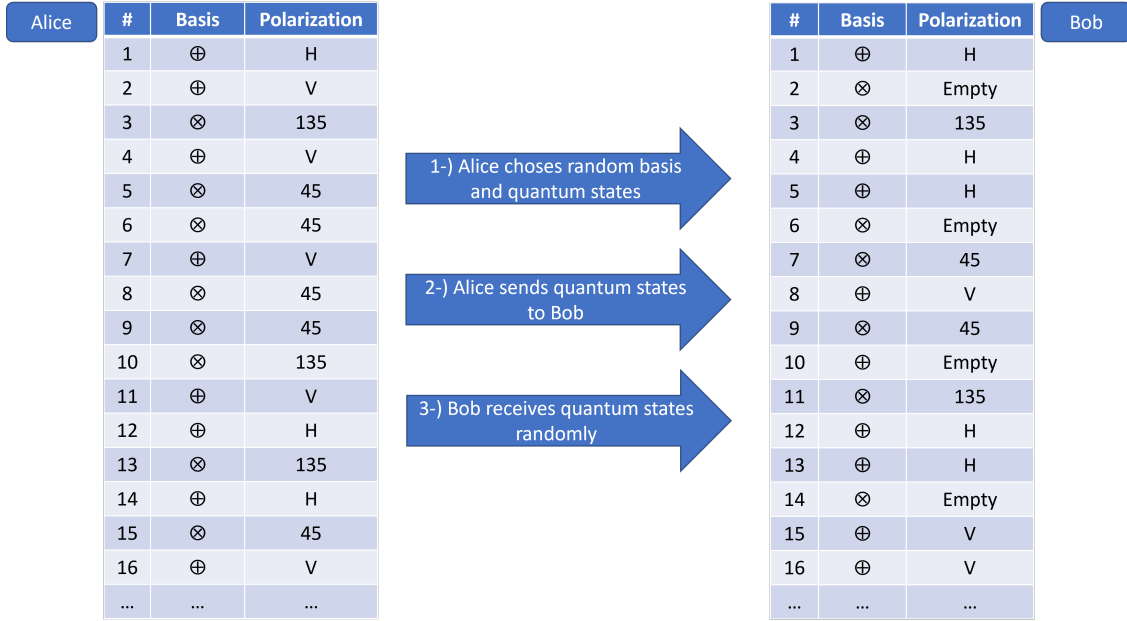


**Şekil 8:** BB84 protokolü için polarizasyon değerlerine karşılık gelen bit değerlerinin gösterildiği örnek bir şema. Görselde beyaz bir ışık kaynağından gelen rastgele polarizasyonlardaki fotonlar Alice tarafından BB84 protokolüne uygun polarizasyonlara çevrilerek Bob tarafına gönderilmektedir. Bob ise köşegensel ve ortogonal bazlarda rastgele ölçümler yapmaktadır.

BB84 protokolünde hem de bir sonraki kısımda anlatılacak olan B92 protokolünde, polarizasyonun kodlanması için birbirine dik olmayan iki baz kullanılmaktadır. Birbilerine dik olmadıkları sürece hangi iki bazın kullanıldığı önemli olmamakla birlikte, biz burada proje içerisinde yapılan deneysel çalışmalarla da uyumlu olması adına bu iki bazı, ortogonal (orthogonal) ve köşegensel (diagonal) olarak seçiyoruz. Ortogonal baz, ışığın polarizasyonunun optik eksene göre yatay ve dikey olduğu durumları temsil ederken, köşegensel baz yatayla 45 ve 135 derece açı yapan polarizasyonları temsil etmektedir. Bir sonraki kısımda daha detaylı gösterileceği üzere her hangi bir polarizasyon durumu diğerlerinin bir süperpozisyonu olarak yazılabilmektedir. Örnek olarak 45 derece polarizasyonu, yatay ve dikey polarizasyonların süperpozisyonu olarak ifade edilebilir, ve deneysel olarak polarizasyonu yatayla 45 derece yapan foton bir polarizasyona bağlı ışın ayırıcıya (PBS) geldiği takdirde, %50 ihtimalle ya yansır ya da geçer. KAD sistemlerinin güvenliğinin temelini buradaki olasılığa dayalı ölçümler oluşturmaktadır.

**Şekil-8**, BB84 protokolünde kullanılan polarizasyonları ve bunlara atanan bit değerlerini göstermektedir. Alice tarafından, yatay ve 45 polarizasyonlarına 1-bit, dikey ve 135 polarizasyonlarına 0-bit ataması yapılmıştır. Polarizasyonlara karşılık gelen bit değerleri, Alice ve Bob tarafından klasik kanal aracılığı ile paylaşıldıktan sonra anahtar dağıtımını sırasıyla aşağıda verilen adımları izler.

- Alice, hem bazlar hem de polarizasyonlar tamamen rastgele (%25 ihtimalle dikey, yatay, 45 ve 135 polarizasyonlarından biri) olacak şekilde bir ham-anahtar (raw key) oluşturur.
- Alice her bir fotonun polarizasyonunu oluşturduğu listeye göre çevirir ve "kuantum kanalı"



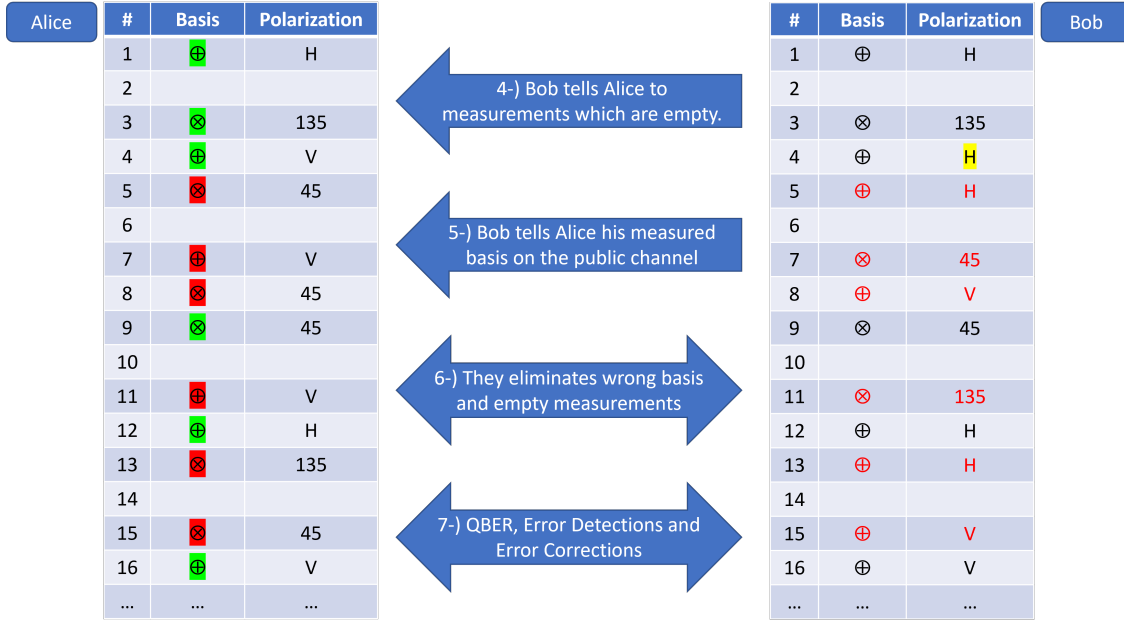
**Şekil 9:** BB84 protokolü ham-anahtar oluşumu. Alice rastgele bazlarda ve polarizasyonlarda seçtiği fotonları Bob'a gönderir, ve Bob gelen fotonları yine rastgele bazlarda ölçer.

üzerinden Bob'a gönderir.

- Bob gönderilen her bir fotonu tamamen rastgele (%50 ihtimalle ortogonal veya %50 ihtimalle köşegenel) olacak şekilde herhangi bir bazda dedekte eder ve kendi ham-anahtarını oluşturur.

Bu noktaya kadar yapılan işlemler **Şekil-9**'da özetlenmiştir. Bu noktada hem Alice hem de Bob kendi ham-anahtarlarını oluşturmuşlardır ve Bob'un rastgele ölçümleri yüzünden bu ham-anahtarlar birbirlerinden farklıdır. Burada protokolden kaynaklı olmayıp, tamamen deneysel bir etkiden de söz etmek iyi olabilir. İdeal durumlarda Alice tarafından gönderilen her bir fotonun Bob tarafından da ölçülmesi söz konusudur fakat gerçek bir deney düzeneğinde hem optik elemanların hem de kullanılan dedektörlerin ideal olmayışından kaynaklı kayıplar olmaktadır. Alice'in gönderdiği bir foton, optik yolda bahsedilen sebeplerden dolayı kaybolabilir ve bu durum Bob'un ölçümlerine boşluklar olarak yansır. Protokolün geri kalanı sırasıyla aşağıdaki gibi devam etmektedir:

- Bob boş ölçümleri Alice ile "klasik kanal" üzerinden paylaşır.
- Bob kendi ölçüm yaptığı bazıları "klasik kanal" üzerinden Alice ile paylaşır. Burada ölçümlerin kendisi değil, sadece ölçümün yapıldığı baz paylaşılmaktadır.



**Şekil 10:** BB84 protokolü elenen-anahtar oluşumu. Bob boş ölçümleri ve yanlış bazda yaptığı ölçümleri Alice ile "klasik" kalan üzerinden paylaştıktan sonra karşılıklı olarak bu ölçümler elenir ve elenen-anahtar oluşturulur.

- Alice ve Bob, hem boş ölçümleri hem de Bob'un yanlış bazda yaptığı ölçümleri kendi ham-anahtarlarından çıkarırlar. Boş ve yanlış bazda yapılan ölçümlerin çıkarıldığı yeni anahtarlara elenmiş-anahtar (sifted key) denir.
- Alice ve Bob, elenmiş-anahtar üzerinden çeşitli hata düzeltme algoritmaları uygulayarak, kuantum hata oranlarını hesaplarlar.

Son dört maddenin özeti **Şekil-10**'da verilmiştir. Kırmızı ile gösterilenler Bob tarafından yanlış bazda yapılan ölçümleri, yeşil ile gösterilenler ise doğru bazda yapılan ölçümleri göstermektedir. Bob'un gelen fotonları %50 ihtimalle rastgele bazlarda ölçmesi, istatistiksel olarak ölçümlerin yarısının yanlış bazda yapılması anlamına gelir, bu sebeple BB84 protokolünün verimi en ideal şartlarda bile %50'dir. Bob tarafında sarı ile gösterilen ölçüm ise ideal olmayan deney şartlarından kaynaklanan yanlış ölçümü göstermektedir ve ölçüm sonrası yapılan hata düzeltme algoritmaları ile (bir noktaya kadar) düzeltilebilmektedir. Deneysel şartlardan kaynaklı hataların olmadığı ve kuantum kanalının tamamen güvenli olduğu durumda iki tarafın elenen-anahtarları **Şekil-11**'teki gibi birbirinin aynısı olmalıdır.

Kuantum kanalının güvenli olmadığı durumda ise, araya giren (literatürden genellikle Eve olarak

Alice	#	Basis	Polarization	Key
	1	$\oplus$	H	0
	2	$\otimes$	135	1
	3	$\oplus$	V	1
	4	$\otimes$	45	0
	5	$\oplus$	H	0
	6	$\oplus$	V	1
	...	...	...	...

Bob	#	Basis	Polarization	Key
	1	$\oplus$	H	0
	2	$\otimes$	135	1
	3	$\oplus$	V	1
	4	$\otimes$	45	0
	5	$\oplus$	H	0
	6	$\oplus$	V	1
	...	...	...	...

H=0, V=1, 45=0, 135=1

H=0, V=1, 45=0, 135=1

**Şekil 11:** İdeal bir KAD sisteminde, eleme işlemi yapıldıktan sonra Alice ve Bob tarafında kalan anahtarlar.

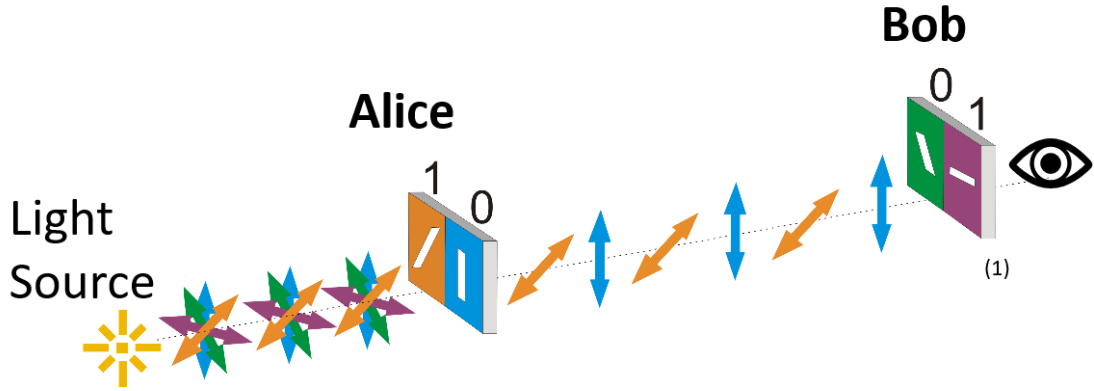
bilinen) kişinin etkileri Bob'un elenen anahtarındaki hatalar olarak yansır. Bu sebeple elenen-anahtar herhangi bir şifreleme süreci için kullanılmadan önce Alice ile Bob klasik kanal üzerinden kendi anahtarlarının ufak bir kısmını, güvenlik kontrolü amacı ile karşılaştırırlar. Eve'in varlığında, Alice ile Bob'un elenen-anahtarlarında minimum %25'lik bir hata payı çıkmaktadır, dolayısı ile %25'in üstündeki hatalar, kuantum kanalının güvenli olmadığını göstergesidir.

### 2.2.2. B92 Protokolü

B92 protokolü, BB84 protokolünün neredeyse aynısı olmakla birlikte en önemli farkı Alice tarafında kodlama için 4 adet polarizasyon yerine 2 adet polarizasyonun kullanılmasıdır. Bob tarafında da buna bağlı olarak sadece 2 polarizasyon durumunda ölçüm yapılmaktadır. Bu iki polarizasyon değerleri BB84'te olduğu gibi yine birbirine dik olmayan iki bazdan seçilmektedirler.

**Şekil-12**, B92 protokolünde kullanılan polarizasyonları ve karşılık gelen bit değerlerini göstermektedir. Alice tarafından sadece dikey (0-bit) ve 45 (1-bit) polarizasyonları gönderilmekte ve Bob tarafında sadece yatay ve 135 polarizasyonlarında ölçümler yapılmaktadır. Bob tarafında yatayda yapılan ölçümler, sadece ve sadece 45 polarizasyonu ile gönderilen fotonlardan gelebileceği için, yatayda yapılan ölçümler 1-bitine karşılık gelirken aynı şekilde 135'te yapılan ölçümler 0-bitine karşılık gelirler. Polarizasyonlara karşılık atanan bit değerleri belirlendikten sonra, anahtar dağıtımı sırasıyla aşağıda verilen adımları izler.

- Alice belirlenen iki polarizasyondan tamamen rastgele olacak şekilde kendi ön-anahtarını oluşturur.

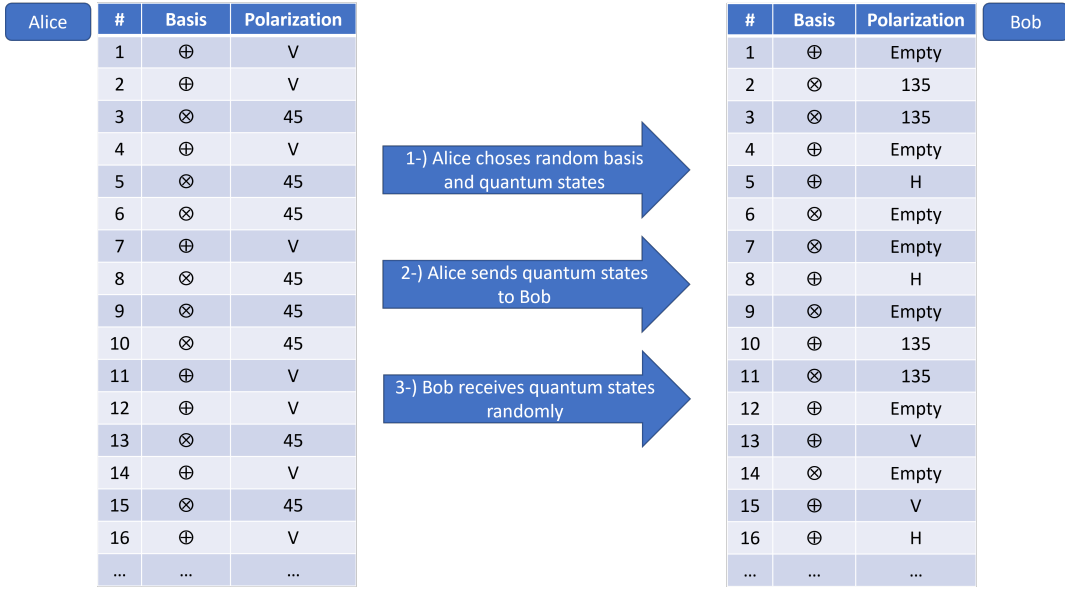


**Şekil 12:** B92 protokolü için, polarizasyon değerlerine karşılık gelen bit değerlerinin gösterildiği örnek bir şema. Görselde beyaz bir ışık kaynağından gelen rastgele polarizasyonlardaki fotonlar Alice tarafından B92 protokolüne uygun polarizasyonlara çevrilerek Bob tarafına gönderilmektedir. Bob ise kalan iki polarizasyon değerinde rastgele olacak şekilde ölçümler yapmaktadır.

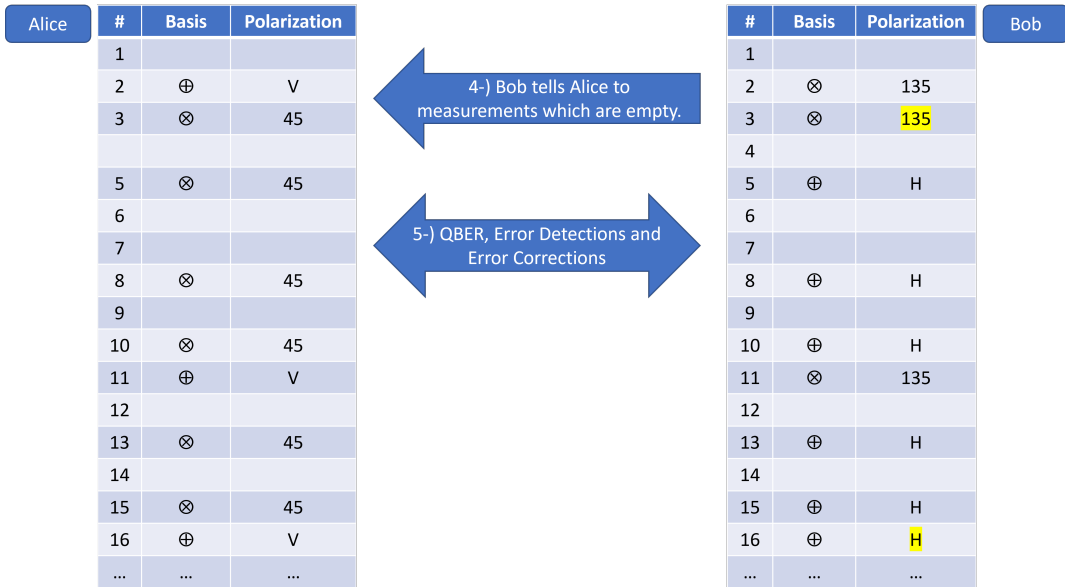
- Alice her bir fotonun polarizasyonunu oluşturduğu listeye göre çevirir ve "kuantum kanalı" üzerinden Bob'a gönderir.
- Bob gönderilen her bir fotonu tamamen rastgele olacak şekilde ölçer ve kendi ön-anahtarını oluşturur.

Bu noktaya kadar yapılanlar **Şekil-13**'te özetlenmiştir. Bir önceki kısımda anlatıldığı üzere yine deneysel şartlardan kaynaklanan kayıplardan dolayı bazı ölçümler boş geçmektedir fakat deneysel şartların yanında B92 protokolünün kendisinden kaynaklanan boş ölçümlerde bulunmaktadır. Örnek olarak Alice tarafından gönderilen 45 derece polarizasyona sahip foton Bob tarafında yatay olarak konulan bir polarizöre geldiğinde %50 ihtimalle geçer veya %50 ihtimalle yansır. Geçtiği durumda tek-foton dedektöründe sinyal alınır ve Bob 1-bitinde ölçüm yapmış olur, fakat yansıdığı takdirde Bob tarafından boş ölçüm olarak kayıt edilir. Bu tarz "protokolden kaynaklı" boş ölçümler sebebiyle B92 protokolünün verimliliği BB84'ün verimliliğinden 2 kat daha azdır. Protokolün kalanı aşağıdaki gibi devam etmektedir.

- Bob boş ölçümleri Alice ile "klasik kanal" üzerinden paylaşır ve karşılıklı olarak boş ölçümlerin olduğu durumları elerler.
- Alice ve Bob, kalan anahtar üzerinden çeşitli hata düzeltme algoritmaları uygulayarak kuantum hata oranlarını hesaplarlar.



**Şekil 13:** B92 protokolü ön-anahtar oluşumu. Alice seçilen 2 polarizasyon değerlerinde rastgele olacak şekilde fotonları Bob tarafına gönderir. Bob ise diğer iki polarizasyon değerinde rastgele olacak şekilde ölçümler yapar. Boş ölçümler hem ideal olmayan optik elemanlar ve dedektörlerden kaynaklı, hem de B92 protokolünden kaynaklıdır.



**Şekil 14:** Boş ölçümlerin elediği durumda kalan anahtarlar. Bob tarafındaki sarı ölçümler deneysel hatalardan kaynaklı yanlış ölçümleri göstermektedir.

Alice					Bob				
#	Basis	Polarization	Key	#	Basis	Polarization	Key		
1	$\oplus$	V	0	1	$\otimes$	135	0		
2	$\otimes$	45	1	2	$\oplus$	H	1		
3	$\otimes$	45	1	3	$\oplus$	H	1		
4	$\otimes$	45	1	4	$\oplus$	H	1		
5	$\otimes$	45	1	5	$\oplus$	H	1		
6	$\oplus$	V	0	6	$\otimes$	135	0		
7	$\otimes$	45	1	7	$\oplus$	H	1		
8	$\otimes$	45	1	8	$\oplus$	H	1		
9	$\oplus$	V	0	9	$\otimes$	135	0		
...	...	...	...	...	...	...	...		

V=0, 45=1

H=1, 135=0

**Şekil 15:** İdeal şartlarda, boş ölçümlerin elendiği durumda Alice'in ve Bob'un elinde kalan anahtarlar.

**Şekil-14**, iki taraf için de boş ölçümlerin elenmiş halini göstermektedir. Sarı ile gösterilen ölçümler yine deneysel hatalardan kaynaklı yanlış ölçümleri göstermektedir ve çeşitli hata algoritmaları ile (bir noktaya kadar) düzeltilebilirler. Düzeltilmiş ölçümler **Şekil-15**'te verilmiştir.

B92 protokolünün BB84'e göre dez avantajı protokolden kaynaklı boş ölçümler sebebiyle veriminin 2 kat daha az olmasıdır. İdeal deneysel şartlarda BB84 protokolü %50 verimle çalışırken, B92 protokolü %25 verimle çalışmaktadır, bu da birim zamanda üretilen anahtar miktarının yarı yarıya azalması demektir. Avantajı ise, 4 yerine 2 polarizasyon kullanılması ve dolayısıyla deneysel düzeneklerin görece daha basit olmasıdır.

### 2.2.3. KAD Sisteminin Polarizasyon Analizi

Kuantum anahtar dağıtım sistemlerinde fotonların polarizasyon davranışlarını etkileyen birçok optik bileşen kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak: elektro-optik modülatörler, yarım veya çeyrek dalga-plakaları, polarizörler ve polarizasyona bağlı ışın ayırıcılar verilebilir. Bu bölümde KAD düzeneğinde kullanılan optik bileşenlerin fotonların polarizasyonu üzerine etkilerinin matematiksel analizi verilmektedir. Ayrıca kurulan düzeneğin beklenen davranışı ile ilgili simülasyona dayalı hesaplamalar paylaşılacaktır.

Yatay ve dikey olarak polarize olmuş bir fotonun durum keti, Jones vektörleri cinsinden aşağıdaki



gibi tanımlanır.

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |90\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Yatay polarizasyon eksenine rastgele bir açıyla gelen foton, yukarıda verilen durum ketlerinin uygun bir süperpozisyonu ile ifade edilebilir. KAD sistemlerinde yaygın olarak, yatay ve dikey polarizasyona ek olarak, yatay eksenle  $45^\circ$  (köşegensel) ve  $135^\circ$ 'lik (anti-köşegensel) açı yapan fotonlar da kullanılmaktadır. Köşegensel ve anti-köşegensel polarizasyona sahip fotonlar aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$|45\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |90\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$|135\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |90\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

BB84 protokolü yukarıda elde edilen 4 farklı polarizasyonu kullanırken, B92 protokolü bunlardan sadece 2 tanesini kullanarak anahtar üretmektedir. KAD uygulamalarında yaygın olarak, lazerden (veya lazer uyarımı sonrası tek-foton kaynaklarından) gelen fotonlar çeşitli optik elemanlardan geçtikten sonra uygun doğrultuyu geçirecek şekilde ayarlanan bir polarizöre gönderilir ve sisteme tek bir polarizasyon doğrultusunda foton girişi sağlanmış olur. Bu noktadan itibaren notasyon olarak yapılan çalışmalarımızla da uyumlu olması açısından, seçilen polarizasyon doğrultusunun dikey polarizasyon olduğunu varsayacağız. Polarizörden geçen fotonlar kodlama işleminin yapılacağı ve anahtar oluşturmak için kilit bir öneme sahip bir cihaz olan EOM'e gönderilirler. EOM, üzerine uygulanan gerilime bağlı olarak içerisinden geçen fotonların polarizasyonları istenilen doğrultulara çevirebilmektedir. Fotonların polarizasyonları üzerinde bu gibi etkiler yapan optik bileşenler, matematiksel olarak durum ketleri üzerine etki eden operatörler olarak ifade edilirler. İçlerinden geçen ışığın polarizasyonu üzerine benzer etkiler yapan optik elemanlara örnek olarak dalga-plakaları verilebilir. Dalga-plakaları, birbirine dik iki eksenle refraktif indeksleri farklı olan (hızlı ve yavaş eksenler) birefringent malzemelerden üretilirler. Rastgele bir polarizasyon yönüne sahip bir foton, birefringent malzemeler içerisinden geçerken, refraktif indeks farkından dolayı, birbirine dik polarizasyon bileşenleri arasında görece bir faz gecikmesi oluşur. Bu da fotonların polarizasyonlarının yönelimlerinin değişmesine neden olur. Bu tarz optik bileşenler Jones matrisleri cinsinden en genel



formda şu şekilde ifade edilir:

$$\hat{O}(\theta, \eta) = \begin{pmatrix} e^{i\frac{\eta}{2}} \text{Cos}^2(\theta) + e^{-i\frac{\eta}{2}} \text{Sin}^2(\theta) & 2i \text{Sin}(\frac{\eta}{2}) \text{Cos}(\theta) \text{Sin}(\theta) \\ 2i \text{Sin}(\frac{\eta}{2}) \text{Cos}(\theta) \text{Sin}(\theta) & e^{-i\frac{\eta}{2}} \text{Cos}^2(\theta) + e^{i\frac{\eta}{2}} \text{Sin}^2(\theta) \end{pmatrix} \quad (4)$$




























Burada  $\theta$  ve  $\eta$  sırasıyla, birefringent malzemenin hızlı ekseninin yatayla yaptığı açı ve malzeme tarafından indüklenen, ışığın dik bileşenleri arasındaki bağıl faz gecikmesidir. Örneğin, yarım dalga-plakaları ve çeyrek dalga-plakaları için gecikme değerleri sırasıyla  $\eta = \pi$  ve  $\eta = \frac{\pi}{2}$  gibi sabit değerler alırlar. Fakat EOM,  $\eta(V)$  gibi üzerine uygulanan gerilime bağlı olarak değişen bir faz gecikmesi sağlayabilmektedir. Dikey polarizasyona sahip bir foton, içerisindeki kristalin hızlı eksenini yatayla  $45^\circ$ 'lik bir açı yapacak şekilde yerleştirilmiş bir modülatör içerisinde geçtiğinde, fotonun değişen durum keti aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} \hat{O}_{mod}\left(\frac{\pi}{4}, \eta(V)\right) | 90 \rangle &= \\ \begin{pmatrix} \text{Cos}(\frac{\eta(V)}{2}) & i \text{Sin}(\frac{\eta(V)}{2}) \\ i \text{Sin}(\frac{\eta(V)}{2}) & \text{Cos}(\frac{\eta(V)}{2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} i \text{Sin}(\frac{\eta(V)}{2}) \\ \text{Cos}(\frac{\eta(V)}{2}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

Denklemlerden de görülebildiği üzere, modülatörün uyguladığı faz gecikmesi  $\eta = 0, \pm\pi, \pm2\pi \dots$  değerlerine **eşit olmadığı** durumlarda, doğrusal polarizasyonu eliptik polarizasyona dönüştürmektedir. Polarizasyon bileşenleri arasında bu şekilde bağıl bir faz farkı oluşması, KAD protokollerinde kullanılmak istenen köşgensel polarizasyon doğrultularının elde edilmesine engel olmaktadır. Bu istenmeyen etkilerin deneysel sonuçları daha sonra gösterilecektir. Bu istenmeyen etkileri düzeltmek için modülatörün çıkışına, hızlı eksenini yatay eksene paralel olacak şekilde ( $\theta = 0^\circ$ ) bir çeyrek dalga-plakası konulması gerekmektedir. Sisteme uygun konumda çeyrek dalga-plakası yerleştirdikten sonra, fotonun durum keti aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \hat{O}_{dp}\left(0, \frac{\pi}{4}\right) \hat{O}_{mod}\left(\frac{\pi}{4}, \eta(V)\right) | 90 \rangle &= \\ \begin{pmatrix} e^{i\frac{\pi}{4}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\pi}{4}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \text{Cos}(\frac{\eta(V)}{2}) & i \text{Sin}(\frac{\eta(V)}{2}) \\ i \text{Sin}(\frac{\eta(V)}{2}) & \text{Cos}(\frac{\eta(V)}{2}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} &= \\ \begin{pmatrix} e^{i\frac{\pi}{4}} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\pi}{4}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i \text{Sin}(\frac{\eta(V)}{2}) \\ \text{Cos}(\frac{\eta(V)}{2}) \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} e^{i\frac{3\pi}{4}} \text{Sin}(\frac{\eta(V)}{2}) \\ e^{-i\frac{\pi}{4}} \text{Cos}(\frac{\eta(V)}{2}) \end{pmatrix} \\ &= e^{-i\frac{\pi}{4}} \begin{pmatrix} \text{Sin}(\frac{\eta(V)}{2}) \\ \text{Cos}(\frac{\eta(V)}{2}) \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

Denklem (6)'dan görülebildiği gibi, doğru açıda yerleştirilmiş olan çeyrek dalga-plakası, mod-

Giriş Polarizasyonu									
Modülatöre Uygulanan Voltaj V	$-V_\pi$	$-\frac{3V_\pi}{4}$	$-\frac{V_\pi}{2}$	$-\frac{V_\pi}{4}$	0	$\frac{V_\pi}{4}$	$\frac{V_\pi}{2}$	$\frac{3V_\pi}{4}$	$V_\pi$
Faz Gecikmesi $\eta(V)$	$-\pi$	$-\frac{3\pi}{4}$	$-\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{4}$	0	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{2}$	$\frac{3\pi}{4}$	$\pi$
Modülatör Çıkışı ( $\theta = 45^\circ, \eta(V)$ )									
ÇDP Çıkışı ( $\theta = 0^\circ, \eta = \frac{\pi}{2}$ )									

**Şekil 16:** Dikey gelen fotonun EOM'den sonra ve ÇDP'dan sonraki polarizasyonunun teorik olarak gösterimi

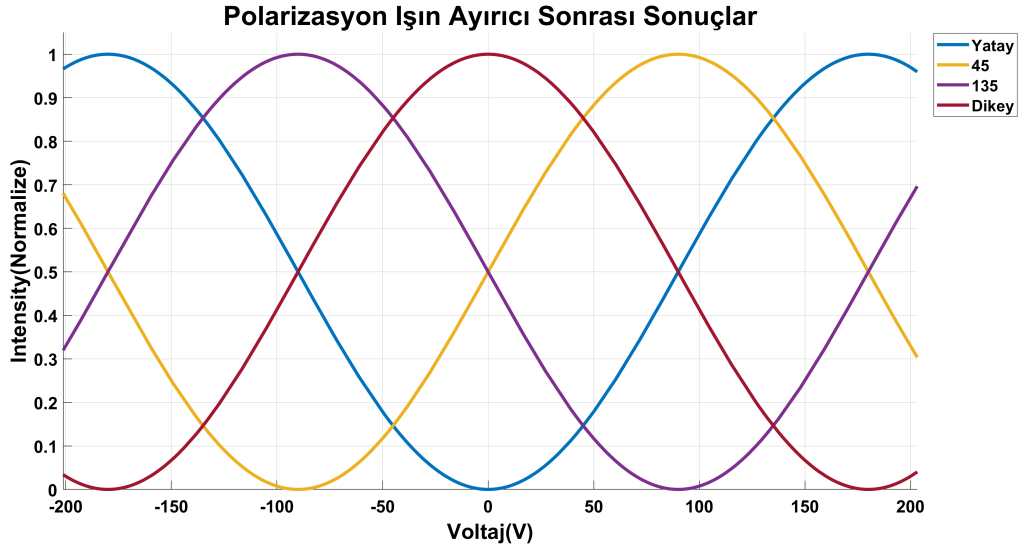
ülatörden kaynaklı eliptik polarizasyona sahip fotonları doğrusal polarizasyona çevirebilmektedir. Daha iyi yorumlanacak bir sonuç elde edebilmek adına, yukarıdaki denklemi yatay ve dikey polarizasyonların süperpozisyonu olarak yazarsak,

$$\hat{O}_{dp}\left(0, \frac{\pi}{4}\right) \hat{O}_{mod}\left(\frac{\pi}{4}, \eta(V)\right) |90\rangle = e^{-i\frac{\pi}{4}} \begin{pmatrix} \text{Sin}\left(\frac{\eta(V)}{2}\right) \\ \text{Cos}\left(\frac{\eta(V)}{2}\right) \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\hat{O}_{dp}\left(0, \frac{\pi}{4}\right) \hat{O}_{mod}\left(\frac{\pi}{4}, \eta(V)\right) |90\rangle = e^{-i\frac{\pi}{4}} \left( \text{Sin}\left(\frac{\eta(V)}{2}\right) |0\rangle + \text{Cos}\left(\frac{\eta(V)}{2}\right) |90\rangle \right)$$

elde ederiz. Denklem (7)'de bulunan ortak faz çarpanı  $e^{-i\frac{\pi}{4}}$ , polarizasyonun doğrultusuna bir etkisi olmadığına dikkat edilmelidir. Ortak faz çarpanı skaler çarpan olduğu için aynı fiziksel durum ketine sahip bir fotonun farklı andaki durumunu vermektedir. Burada özel voltaj değerlerinden de bahsetmek gerekmektedir. Polarizasyonu eksene dik yönde gelen bir fotonun polarizasyonunun yönünü  $90^\circ$  değiştirmek için gerekli gerilime  $V_\pi$  denir. Böylece bu gerilimin uygulandığı EOM'e gelen dikey polarizasyona sahip fotonlar modülatörden yatay olarak çıkmaktadırlar. **Sekil-16** dikey yönde bir polarizasyona sahip fotonun uygulanan gerilim değerlerine bağlı olarak değişimini göstermektedir (yukarıdaki denklemler kullanılarak).

Tablonun son iki satırı sırasıyla, modülatör sonrası ve modülatör+çeyrek dalga-plakası sonrası polarizasyonları göstermektedir. Modülatörün çıkışında dik ve yatay polarizasyonların dışındaki polarizasyonların yönlerinde doğrusallık kaybolmuştur. Fakat modülatörün+çeyrek dalga-plakası kullanıldığında uygulanan tüm gerilimlerde KAD uygulamaları için uygun 4 adet farklı doğrusal polarizasyon elde edilebilmektedir. Ayrıca, uygulanması gereken voltaj değerleri tabloda da verildiği gibi belirlenmiştir.

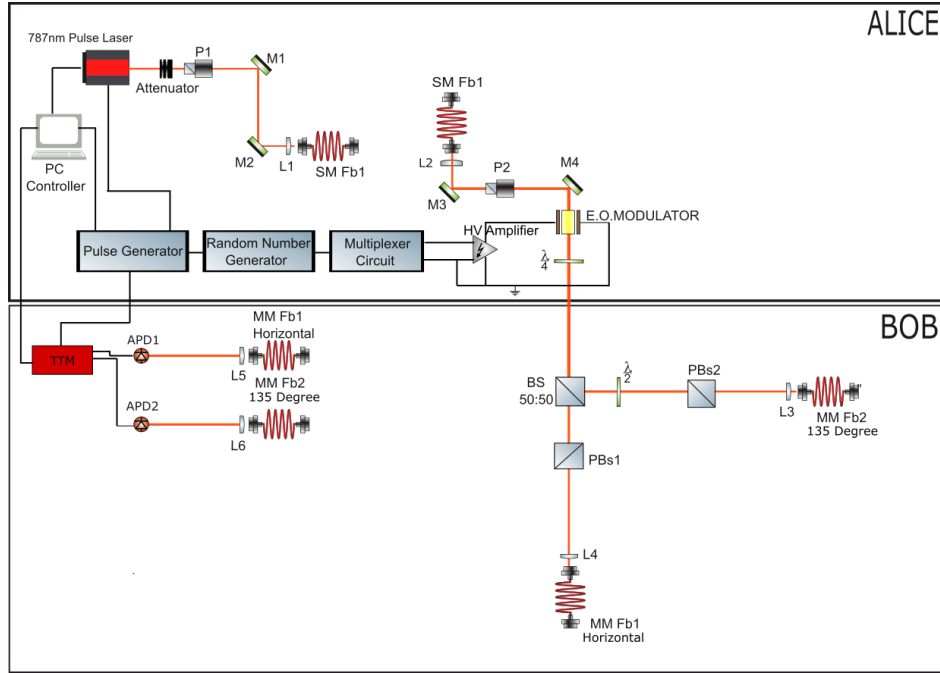


Şekil 17: Dedektörlerde görülmesi beklenen gerilime bağlı polarizasyon durumları.

Şekil-17 ideal (optik hizalanmalara ve diğer etkilere bağlı hataların olmadığı) bir BB84 protokolünde modülatöre dikey olarak gönderilen fotonların, protokol içerisindeki optik bileşenlerden geçtikten sonra her bir tek-foton dedektöründe gözlenmesi beklenen normalize olmuş ışın şiddeti değerlerini göstermektedir. Örnek olarak, modülatöre uygulanan voltaj değeri 0 olduğunda modülatör foton üzerine bir etki etmeyeceği için, dikey ölçüm yapan kolda maksimum ışın şiddeti olması beklenmektedir.

### 2.3. Zayıflatılmış Lazer ile KAD

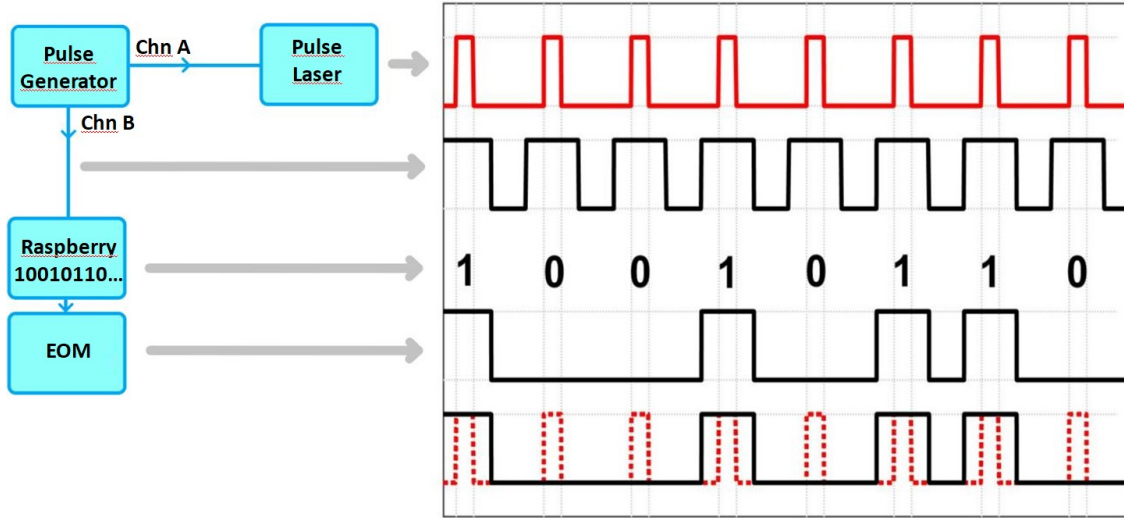
Proje içerisinde Şekil-18 ile gösterilen B92 protokolüne uygun kuantum anahtar dağıtımı düzeneği kurularak, tek-fotonlar öncesi zayıflatılmış lazer ile testleri yapılmıştır. Bir önceki bölümlerde de bahsedildiği üzere B92 protokolü BB84 protokolüne göre enstrümantasyon açısından daha avantajlı olmaktadır. BB84 protokolü 1 adet EOM ve 4 adet eş tek-foton dedektörüne ihtiyaç duyarken, B92 protokolü 1 adet EOM ve 2 adet eş tek-foton dedektörü ile uygulanabilmektedir. Sistemin lazer ile test edilerek tek-fotonlara hazır halde bırakılması, uygun tek-foton adayları bulunduğu takdirde hızlı bir şekilde entegre edilmesine olanak vermektedir.



**Şekil 18:** Proje dahilinde kurulumu yapılan B92 kuantum anahtar dağılımı düzeneği. Dikey polarizasyonda foton akışı sağlayan zayıflatılmış 787 nm darbeleri lazer, bir fiber yardımı ile KAD düzeneğine gönderilir. Lazerden gelen fotonlar elektro-optik modülatörün içerisinde geçerken B92 protokolüne uygun polarizasyonlara çevrilerek Bob kısmına gönderilirler. Gelen fotonlar Bob kısmında bir 50/50 ışın ayırıcından geçerek polarizasyona bağlı ışın ayırıcılarda protokole uygun polarizasyon seçimleri yapılarak tek-foton dedektörlerine gönderilirler. Bir bilgisayar yardımı ile lazer, EOM ve dedektörlerde ölçülen fotonların senkronizasyonu yapılır.

#### a) Darbeli Lazer ve Polarizasyon Kodlaması Senkronizasyonu

Elektro-optik modülatör, üzerine uygulanan voltaj değerine bağlı olarak içerisinde geçen lazer ışığını istenilen polarizasyon değerlerine döndürmektedir. Lazer ışığı darbeleri bir şekilde atıldığı için, modülatör ile lazer darbelerinin zamansal senkronizasyonu çok kritik bir rol oynamaktadır. Arzu edilen polarizasyonların hatasız bir şekilde elde edilebilmesi için, modülatörün, lazer ışığı gelmeden istenilen gerilimde bekletilmesi gerekmektedir. Modülatörün istenilen gerilim değerine geç veya erken sürülmesi, zamansal senkronizasyonu bozmakta ve sistemde hatalara sebep olmaktadır. Senkronizasyonu sağlamak adına hem lazer darbelerini, hem de modülatör hareketini ortak bir titreşim üretici cihaz (oscillator) ile yapmak büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu sebeple sistemde bir tane darbe sinyali üretici bulunmaktadır. İki kanaldan sinyal çıkışı verebilen bu sinyal üreticinin bir kanalını (kanal A) darbeleri lazeri tetiklemek için kullanırken, diğer kanalı (kanal B) aynı frekansta olacak şekilde modülatörü tetiklemek için kullanılmaktadır. Kuantum anahtar dağılımını rastgele



**Şekil 19:** B92 KAD protokolü sinyal gösterimleri. Darbeli sinyal üreticinde üretilen 2 dalga, kanal A ve kanal B üzerinden darbeli lazere ve EOM'e gitmek üzere Raspberry Pi işlemcisine gitmektedir. Raspberry Pi bilgisayarı, daha önceden belirlenmiş bir rastsal sayı serisi ile kanal B sinyallerini karşılaştırarak, 1 ise EOM'e düşük sinyal, 0 ise yüksek sinyal göndererek, kodlama işlemini gerçekleştirir.

seçilmiş polarizasyonlar ile yapabilmek için, iki kanalında frekanslarının aynı olması gerekmektedir. Öte yandan, eğer 0 ve 1'lerin tekrar eden bir kombinasyonu ile KAD yapmak istersek, lazer frekansının (kanal A'nın) modülatörün sürülme frekansının (kanal B'nin) tam katı olması yeterlidir.

**Şekil-19**, darbeli sinyal üreticinin 2 kanalından çıkan sinyallerin yapısını ve modülatöre uygulanan rastgelelik sonucunda elde edilmesi beklenen sinyal çıktısını göstermektedir. Kanal A ve B, aynı frekansta fakat farklı darbe sürelerinde sinyallerden oluşmaktadır. Aynı zamanda, Kanal A ile B arasında senkronizasyonu sağlamak amacıyla göreceli bir faz farkı da bulunmaktadır. Darbe süresi düşük olan kanal A direkt olarak lazere sürmek için kullanılırken, darbe süresi A'ya göre daha yüksek olan kanal B, önce Raspberry Pi bilgisayara gelir. Raspberry Pi, önceden belirlenmiş rastgele bitlerden oluşan (0 ve 1'lerin rastgele kombinasyonu) bir seri ile kendisine gönderilen darbelerin karşılaştırmasını yapar. Darbe sinyali geldiği zaman eğer serinin o darbeye gelen elemanı 1 ise, modülatöre düşük sinyal gönderir (yani sinyal göndermez), eğer seri 0 ise yüksek sinyal gönderir. Böylelikle lazer ışığı üzerine 0 ve 1'lerin kodlanması rastgele bir şekilde yapılmış olur. Buradaki önemli noktalardan biri de modülatör sinyali ile lazer sinyalinin üst üste bindirilerek senkronize bir şekilde çalışmasıdır. Eğer lazer darbeleri ile EOM sinyali üst üste oturmaz ise, EOM polarizasyonları istenildiği gibi çeviremeyecek ve ölçümlerde hataya sebep olacaktır. Bir diğer önemli nokta ise, yüksek



hızlarda etkisini gösteren 2 kanal arasındaki elektroniksel ve/veya yazılımsal “görelî” gecikmedir. Düşük periyotlarda (yüksek frekans) ardışık dalgalar arası mesafe azaldığı için, **Şekil-19**'deki EOM sinyallerinin büyüklüğü, lazer sinyalinin büyüklüğü ile kıyaslanabilir hale gelmektedir. İki sinyal arasında oluşan gecikmeler, hızlı bir şekilde senkronizasyon bozulmasına yol açmakta ve hatalara sebep olmaktadır. Proje kapsamında, hBN içerisindeki tek foton kaynakları ile KAD yapılabilmesi için yüksek hızlara çıkmak çok büyük önem taşımaktadır.

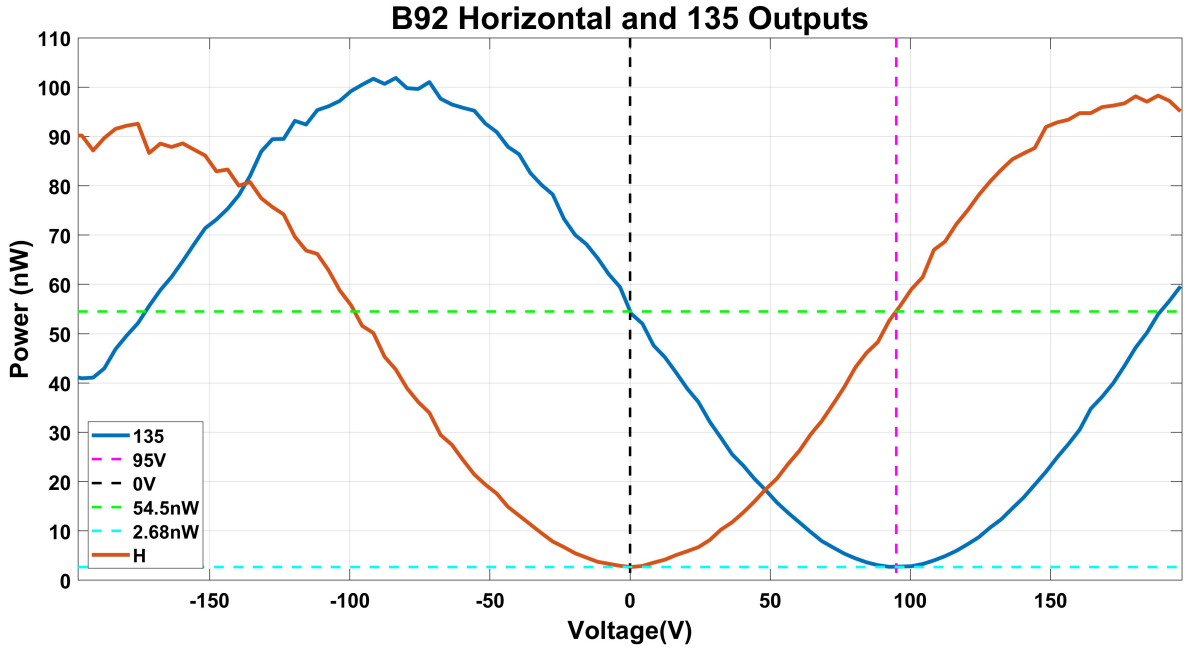
### b) Modülatör Optimizasyon Ölçümleri

B92 düzeneği kurulduktan sonraki ilk aşama, modülatörün istenildiği gibi çalıştığından emin olmaktır. Lazerden gelen dikey polarizasyondaki fotonları, tam olarak 45 dereceye döndürmek için gerekli olan voltaj değerini saptayabilmek adına, her iki ölçüm kolunda da modülatöre uygulanan gerilim değerlerine bağlı, ışık şiddeti ölçümleri yapılmıştır. **Şekil-20**, uygulanan sürücü voltaj değerine göre her iki kolda bir ışık şiddeti ölçer ile alınan ölçümleri göstermektedir. Mavi ve turuncu çizgiler sırasıyla, 135 ve yatay kolundaki ışık şiddeti ölçümlerini vermektedir. Modülatöre uygulanan gerilim 0 V olduğunda (siyah kesikli çizgi) modülatör bir döndürme işlemi yapmaz ve ışık Alice kısmından dikey olarak çıkar. Dikey polarizasyonda gelen ışık, 50:50 ışın ayırıcıdan yatay koluna geçen ışın sistemden atıldığı için, yatayda minimum ışık şiddeti görülmektedir. Öte yandan dikey gelen ışın, 45-135 koluna yansır ise, %50 ihtimalle 135 kolunda ölçülme olasılığı vardır ve ölçümlerden de görülebileceği gibi 0 voltta 135 kolunda maksimum ışık şiddetinin yarısı görülmektedir (yeşil kesikli çizgi). Aynı sistematik düşünce yapısı, 50:50 ışın ayırıcıya gelen 45 derece ışık içinde tekrarlandığında 135 kolunda minimum ışık şiddeti ölçülmesi gerektiği bulunabilir. **Şekil-20**'ten görülebildiği üzere, 135'in minimum olduğu voltaj değeri yaklaşık 95 V civarındadır (mor kesikli çizgi).

### c) Tek-foton Dedektörlerinin Entegrasyonu

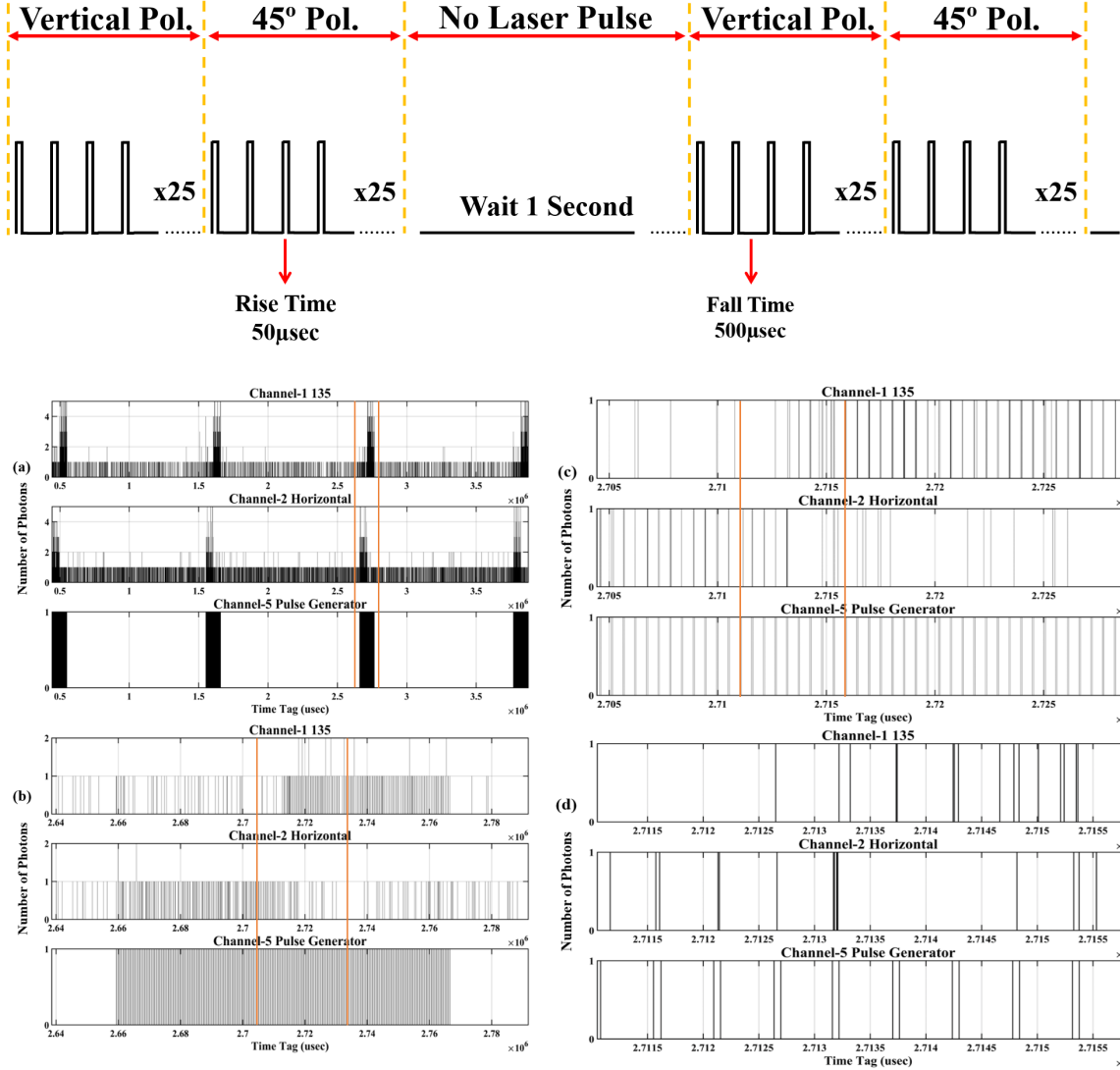
Modülatör ve lazer darbesi sinyallerindeki üst üste binmeyi tek foton dedektörlerinde görebilmek ve APD sinyallerinin lazer gücüne bağlı değişimini anlayabilmek adına belirli bir şablonda darbeler gönderilerek her bir darbe için o andaki EOM sinyali ve karşılık gelen dedektör sinyalleri üzerinden yapılan ölçümler **Şekil-21** ve **Şekil-22**'te verilmiştir. **Şekil-21**'ün üst panelinde gösterilen sinyal şablonu şu şekildedir:

- 200 darbe ve ardından 1 saniyelik bekleme süresinden oluşan bir döngü
- Periyot 550  $\mu s$ , darbe süresi ise 50  $\mu s$
- EOM, ilk 100 darbe boyunca, 45 polarizasyon geçirecek
- EOM, ikinci 100 darbe boyunca dikey polarizasyon geçirecek

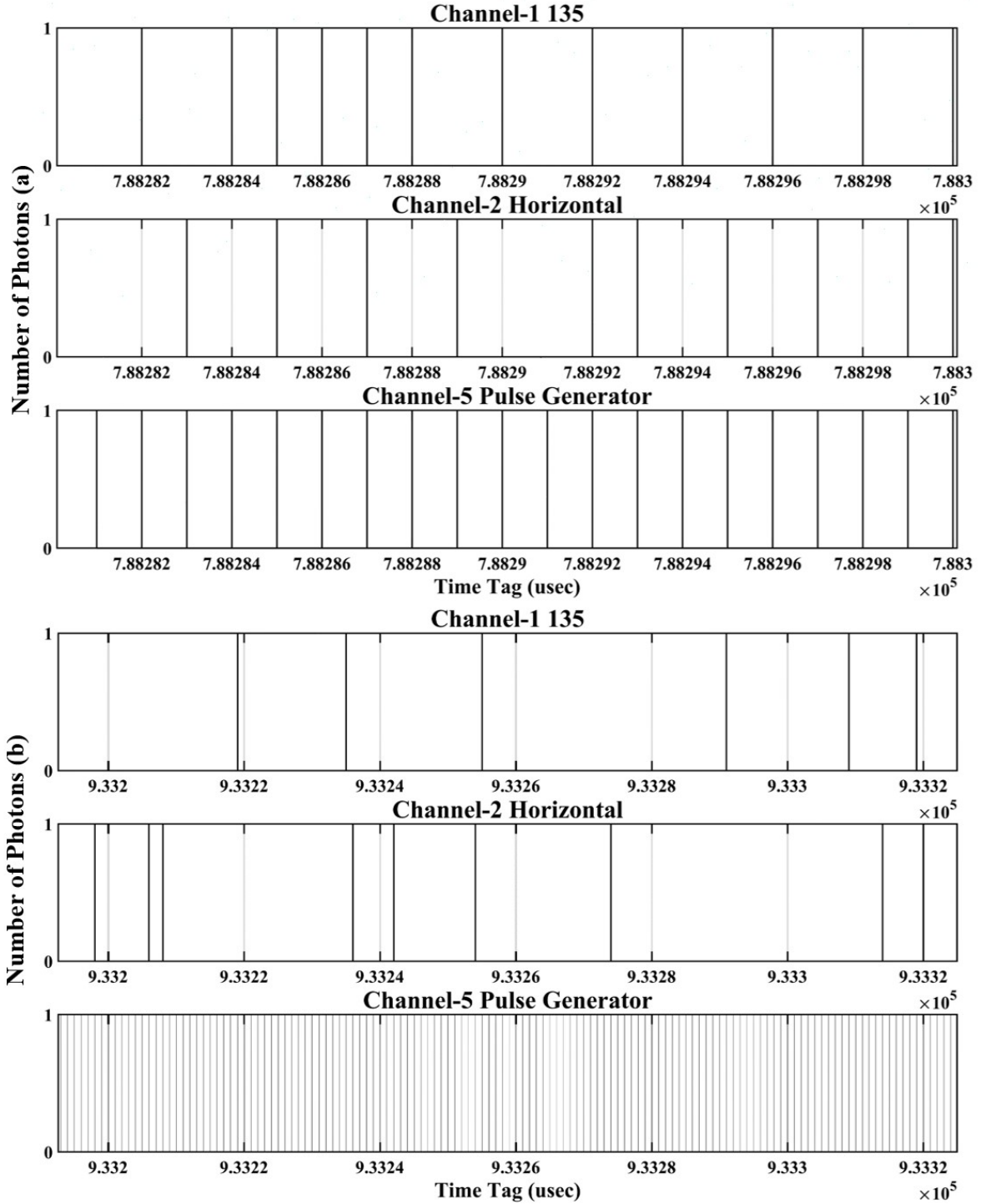


**Şekil 20:** EOM voltaj tarama ölçümleri. Modülatöre verilen voltaj değerlerine göre yatay ve 135 kollarında ölçülen ışık şiddeti değerleri

**Şekil-21** içerisinde verilen (a), (b), (c) ve (d) panellerinin her biri 3'er grafikten oluşmaktadır. Üst grafik 135 detektöründen, orta grafik yatay detektöründen ve alt grafik ise lazer kanalından gelen sinyal zamanlarının histogramlarını göstermektedir. **Şekil-21(a)**'da, yatay kanalında görülen sinyaller her zaman 135 kanalında görülen sinyallerden önce gelmektedir. Turuncuyla işaretlenen kısımlar, bir sonraki grafikte yaklaşıtırlan bölgeleri göstermektedir. **Şekil-21(d)**, farklı EOM polarizasyonlarının (100x45, 100xDikey) kesişme noktasının etrafındaki 10 darbelik bölgeyi göstermektedir. Görülebildiği üzere,  $t = 2.7135 \times 10^6 \mu s$  zamanı, tam olarak 45 polarizasyonlarının bittiği, dikey polarizasyonların başladığı andır. Alt panelde görülen lazer sinyalleri her bir lazer darbesi için, hem çıkış (rising edge) hem de iniş (falling edge) sinyallerinden oluşmaktadır. **Şekil-22** ise **Şekil-21(d)** grafiğinin 2 farklı lazer gücünde alınmış ölçümlerini göstermektedir. Yüksek lazer gücünde alınan (a) ölçümleri, düşük lazer gücünde alınan (b) ölçümlerine göre daha küçük bir zaman aralığına bakmasına rağmen detektörlerde kaydedilen sinyal sayıları karşılaştırıldığında, (a)'da çok daha fazla sinyal sayısı görülmektedir. Bir diğer dikkat edilmesi gereken nokta ise, yüksek lazer gücünde, ortaya çıkan çift sinyallerdir. İki detektöre birden aynı lazer darbesinden sonra gelen sinyaller, yüksek lazer gücünden dolayı, polarizasyona bağlı ayırım yapan ışın ayırıcıların doğru işleyememesinden kaynaklanmaktadır. Bu tarz çift sinyaller hatalara sebep olduğu için kuantum anahtar dağıtımı için kullanılamaz. Öte yandan lazerin gereğinden fazla zayıflatılması ise, APD'lerin büyük ölçüde boş



**Şekil 21:** Lazer darbeleri ile modülatör arasındaki zamansal senkronizasyonun kontrolü için hazırlanan sinyal şablonu ve ölçüm sonuçları. (Yukarı panel) Sinyal şablonu iki kısımdan oluşmakta ve kendini tekrar etmektedir. Lazer ilk kısımda, periyodu  $550 \mu\text{s}$  olan ( $50 \mu\text{s}$  yüksek -  $500 \mu\text{s}$  düşük sinyal olacak şekilde) 200 darbe atmaktadır. İkinci kısım ise 1 saniyelik düşük sinyali içermektedir. Modülatör ilk 100 darbe boyunca gelen fotonların polarizasyonlarını  $45$  dereceye, sonraki 100 darbe boyunca ise dikeye döndürmektedir. (a), (b), (c) ve (d) figürlerinin her biri, 200 lazer darbesi bölgesindeki 135 (üstte) ve yatay (ortada) kollarındaki dedektörlerden gelen sinyal zamanlarını ve bu sinyalleri oluşturan fotonların üretilme zamanlarını (altta) göstermektedir. Figürler,  $45$  ve dikey polarizasyonlarının kesişme noktasından gelen sinyallere giderek yaklaşıtırlmaktadır. Turuncu ile işaretlenen bölgeler, bir sonraki figürde yaklaşıtırlan alanları göstermektedir.

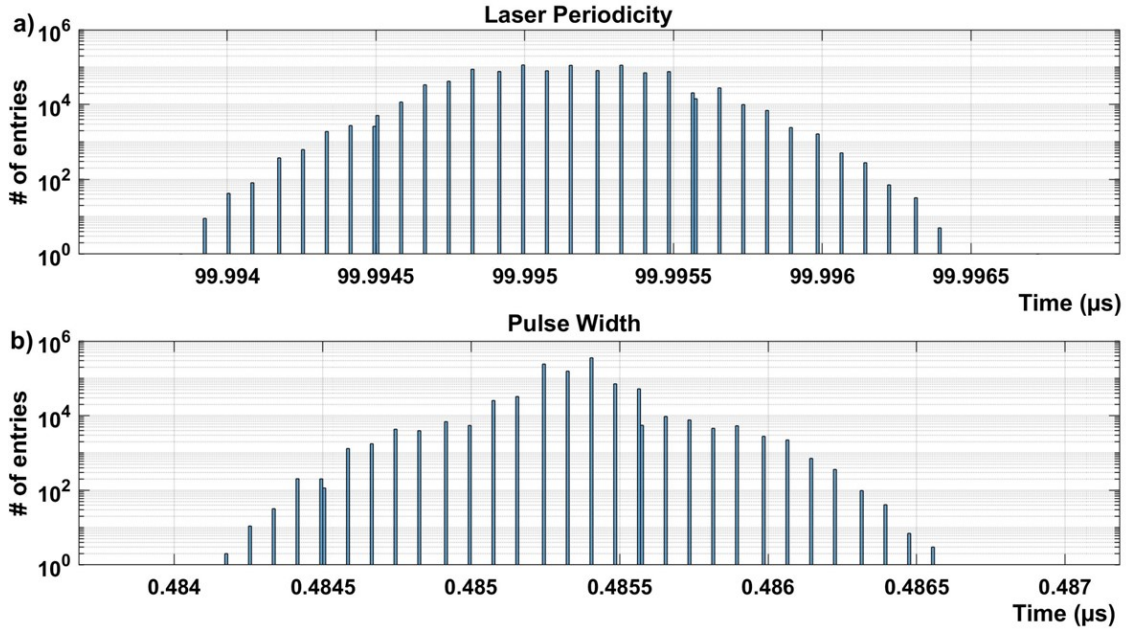


**Şekil 22:** Farklı lazer güçlerinde, 135 (üstte) ve yatay (ortada) kollarından gelen dedektör sinyalleri ve bu sinyalleri oluşturan fotonların üretilme zamanları (altta). (a) ve (b) sırasıyla yüksek ve düşük lazer güçlerinde alınan ölçümleri göstermektedir.

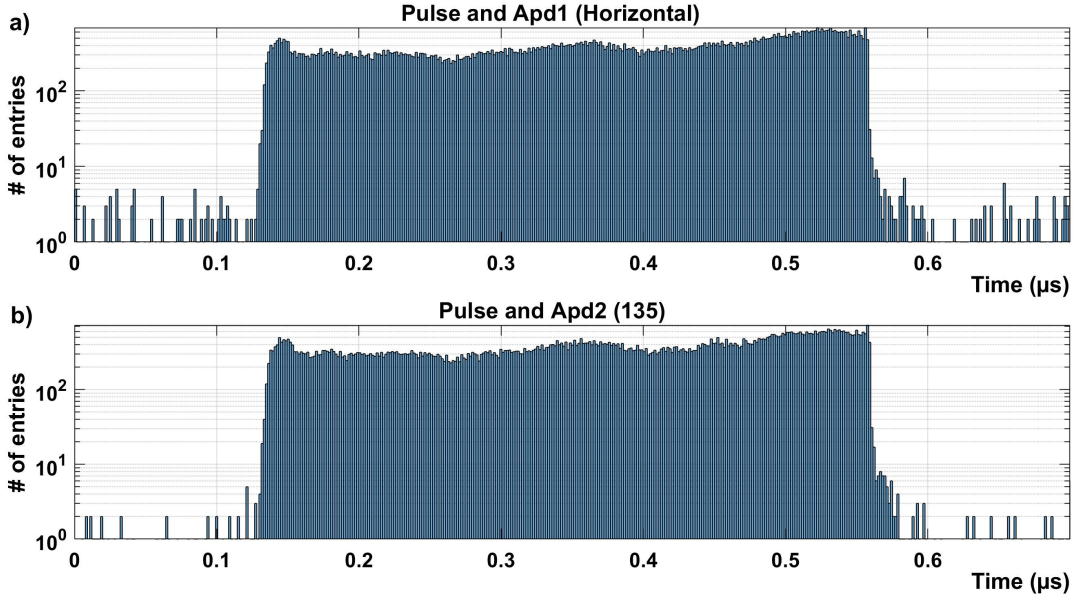
geçmesine sebep olur ve üretilen anahtarın büyüklüğünü düşürmektedir. Optimum lazer gücünün elde edilmesi için, aynı optik koşullarda (düzenegin hizalanması bakımından) farklı lazer güçlerinde sistematik ölçümler alınmıştır.

#### d) 10 KHz Kuantum Anahtar Dağıtımı

Bu bölümde 10 kHz’te zayıflatılmış darbeleri lazer ile yapılan kuantum anahtar dağıtım çalışmaları gösterilerek, 10 kHz için hesaplanan saniye başına bit üretimleri (kbps) ve kuantum bit hata oranları (KBHO, quantum bit error rate - QBER) verilecektir. KAD ölçümlerinden önce, sinyal üreticinin 10 kHz hızlarındaki gerçek periyodikliği, üretilen darbelerin yüksek hızlardaki şekli ve sistemin elektronik gecikmesi hakkında ölçümler alınmıştır. **Şekil-23**, 10 kHz frekansında, 500 ns darbe süresinde üretilen, lazeri tetiklemek için kullanılan sinyalin ölçülen periyodikliğini ve darbe süresini vermektedir. 10 kHz frekans, 100  $\mu$ s periyoda karşılık gelmesine rağmen, figürden de görülebileceği üzere, sinyalin periyodikliği 99.995  $\mu$ s etrafında gaussian bir dağılım göstermektedir. 50 nanosaniyelik bir fark, ilk bakışta çok fazla gözükmesine de, ileride çıkılması planlanan MHz seviyesindeki frekanslar için senkronizasyon sorunları teşkil etmekte ve sistemi elektronik olarak kısıtlamaktadır. Darbe süresi ise 500 ns olmasına rağmen 485 ns civarında bir dağılım göstermektedir. Bu farkın da sebebi yine, sinyal üreticiden kaynaklı yüksek hızlarda ve düşük darbe sürelerinde meydana gelen sinyal şeklin-



**Şekil 23:** Darbeleri sinyal üreticisi tarafından lazeri sürmek için kullanılan tetikleme sinyalinin “ölçülen” periyodikliği (üstte) ve darbe aralığı (altta). Sinyal üreticisi, 10 kHz frekansında (100  $\mu$ s periyod), 0.5  $\mu$ s darbe aralığında çalışmak üzere ayarlanmıştır.



**Şekil 24:** Lazer tetikleme sinyali ile APD sinyalleri arasında geçen zamanın histogramları. Figürler lazer tetikleme sinyali ile yatay (üstte) ve 135 (altta) kollarında dedekte edilen sinyaller arasındaki gecikme zamanlarını göstermektedir. Sinyal üretici tarafından lazere gönderilen tetikleme sinyali ile, APD’lerde alınan ölçüm sinyalleri arasında yaklaşık 130 nanosaniyelik, elektronik gecikmelerden kaynaklı bir zaman farkı görülmektedir.

deki bozulmalardır. Sinyallerin, yüksek hızlarda şekillerini koruyabilmesi, hem elektronik anlamda ciddi bir mühendislik, hem de özellikle rastgele serinin dahil edildiği yazılım kısmında iyileştirmeler yapılmasını gerektirmektedir.

KAD ölçümlerinin doğru bir biçimde analiz edilerek, hataları minimuma indirmek için lazer darbelerinden ne kadar bir süre sonra APD’lerde sinyal geldiğini bilmek önemlidir. Sinyal üreticiden lazeri tetiklemek için gönderilen sinyal hem kablo uzunluğuna bağlı hem de lazerin iç elektronığına bağlı sebeplerden dolayı elektronik bir gecikmeye maruz kalmaktadır. Bir diğer gecikme de APD sinyallerinin, zaman etiketleme modülüne bağlandıkları kablo üzerinden gelmektedir. Hataların minimuma indirilebilmesi için bu tarz gecikmelerin iyi analiz edilerek, kullanılan yazılımsal algoritmalar içerisine entegre edilmesi gerekmektedir. **Şekil-24**, lazer sinyallerinden sonra APD’lerde alınan sinyallerdeki gecikmeyi göstermektedir. **Şekil-24(a) ve (b)** figürleri lazer darbesinden sonra sırasıyla, yatay ve 135 detektörlerinde alınan sinyallerin histogramlarını göstermektedir. Lazer darbesinden sonra, iki tek foton detektörü de yaklaşık 130 ns gecikmeyle sinyal almaya başlamıştır. Deneyin yaklaşık 1 metrelik optik yol üzerinde yapıldığı ve ışığın hızı hesaba katıldığı taktirde,



**Tablo 1:** Tekrarlanan ve rastsal bit serileri kullanılarak 10 kHz darbe frekansında gerçekleştirilen kuantum anahtar dağıtımı sonuçları. Saniye başına bit üretimi, birim saniyede eşleşen bit sayısı ile verilmektedir. Kuantum bit hata oranı, eşleşen bit sayısının, tekli sinyal sayısına oranı ile hesaplanır.

	Tekrarlanan Bit Serisi	Rastsal Bit Serisi
Boş Sinyal Sayısı	965843	786079
İkili Sinyal Sayısı	54	2070
Tekli Sinyal Sayısı	34105	211853
Eşleşen Bit Sayısı	32368	203903
Saniye Başına Bit Üretimi	0.32 kbps	2.04 kbps
Kuantum Bit Hata Oranı	%5.1	%3.75

130 ns'lik gecikmenin tamamıyla elektronik ve/veya yazılımsal bir gecikme olduğu görülmektedir. Sinyaller yaklaşık 560 ns civarında keskin bir düşüş göstermektedirler. 485 ns'lik darbe süresi göz önüne alındığında, düşüşün erken başlaması, hem sinyal şekli hem de APD'lerin kendi ölü zamanlarından kaynaklandığı düşünülmektedir. İki APD'nin de ölü zamanı yaklaşık  $1\mu s$  civarındadır, yani APD'ler darbe süresi boyunca herhangi bir anda ölçüm yaptıkları takdirde, o darbe boyunca bir daha ölçüm yapmaya müsait olmayacaklardır. Dolayısıyla darbe süresinin sonuna doğru, sinyallerde düşme görülmektedir. Darbe süresi dışında alınan tek foton ölçümleri ise (130 ns altı, ve 560 ns üstü) hem detektörün içerisindeki elektriksel dalgalanmalardan kaynaklı sahte ölçümlerden hem de laboratuvar ortamındaki gürültü ışınmasından kaynaklanmaktadır. Yine KAD analizi yapılırken, bu sahte ölçümlerin hesaba katılması, KBHO'nı arttırmaktadır. Sahte ölçümlerden kaynaklı hataları minimize etmek için, analiz yapılırken sadece darbe süresi boyunca (bu örnek için 130 ns ile 560 ns arasındaki ölçümler) alınan sinyaller hesaba katılmalıdır.

Yapılan KAD deneyleri, önce basit bir ispat konsepti olarak rastgelelik olmadan, kendini tekrar eden  $\langle 101010.. \rangle$  serisi ile 10 kHz frekans, 300  $\mu s$  darbe süresi ile yapılmıştır. Rastgelelik olmadığı için, modülatör, lazerin yarı frekansında çalıştırılarak kendini tekrar eden bit serisi  $\langle 101010.. \rangle$ , lazerden gelen fotonların polarizasyonlarına kodlanmıştır. 1 milyon darbe atıldıktan sonra, her bir darbe, karşılık gelen bit değeri ve bu bit değerinde ölçüm yapması gereken APD karşılaştırılarak, 2 APD'den yalnızca birinin ölçüm yaptığı durumlardan kaç tanesinin doğru olduğu hesaplanır. Son olarak, bilgisayar ortamında hazırlanmış pseudo-rastsal bir seri ile 10 kHz frekans, 500  $\mu s$  darbe süresi ile KAD gerçekleştirilmiştir. Tablo 1, hem pseudo-rastsal seri ile hem de  $\langle 101010.. \rangle$  serisi ile yapılan KAD deneylerinin sonuçlarını göstermektedir.

#### e) 1 MHz Kuantum Anahtar Dağıtımı

Bu aşamada sistemin çıkabileceği en yüksek darbe frekansında farklı foton sayılarıyla sistem test edilmiştir. 10 kHz darbe frekansında yapılmış olan rastsal bit serisi, Raspberry Pi cihazının yük-



**Tablo 2:** 1 MHz darbe frekansında zayıflatılmış lazer ile alınan KAD sonuçları.

zayıflatma oranı	saniye başına bit üretimi	kuantum bit hata oranı
%50	5.09 kbps	%7.60
%48	22.89 kbps	%6.24
%46	94.00 kbps	%5.31
%44	192.35 kbps	%4.54
%42	231.05 kbps	%4.10
%40	288.95 kbps	%3.75

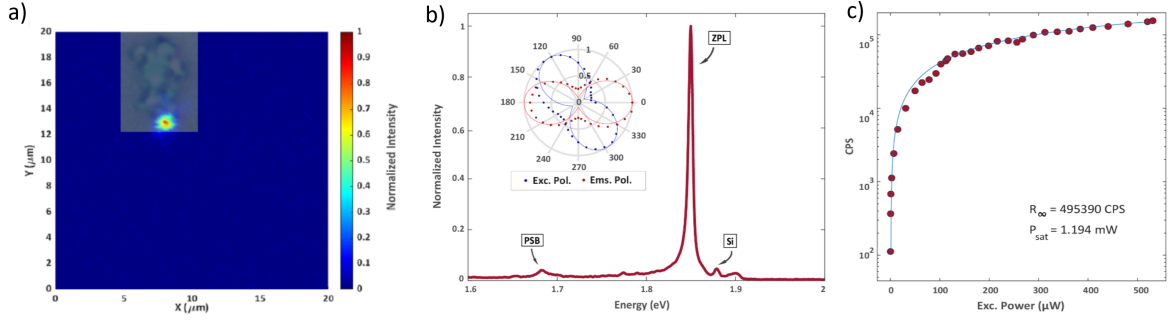
sek darbe hızlarına çıkamamasından dolayı yapılamamıştır. Bu sebeple yalnızca tekrarlanan bit serisi ile KAD 1 MHz darbe frekansında gerçekleştirilmiştir. Burada sistemi 1 MHz ile sınırlayan modülatörün ihtiyacı olan yüksek voltajı sağlayan voltaj yükselticidir. Tablo-2 de 1 MHz darbe frekansında farklı zayıflatma oranlarında gerçekleştirilen KAD deneylerinin sonuçları listelenmiştir. Görüldüğü üzere zayıflatma oranı düşürüldükçe foton sayısının artmasından dolayı saniye başına bit üretimi artmıştır. Sonuç olarak elde ettiğimiz kuantum bit hata oranları sistemin düzgün bir şekilde çalışır olduğuna işaret etmektedir ve artık tek fotonlarla yapılacak deneye hazır olduğunu göstermektedir.

#### 2.4. hBN Tek-foton Kaynağı ile KAD

Bu bölümde oda sıcaklığında hBN kusur merkezlerinden elde edilen tek fotonlar ile yapılan KAD çalışmaları paylaşılacaktır. Bun çalışmalar için örnek üzerinde birçok hBN yığını taranarak, içlerindeki kusur merkezlerinin temel optik karakterizasyonları gerçekleştirilmiş ve bir kataloglama işlemi yapılmıştır. Işıma şiddeti, PL spektrumunun uygunluğu, polarizasyonun doğrusallığı gibi birçok özelliğe bakılarak, aralarından en uygun olan kusur merkezleri KAD adayı olarak belirlenmiştir. Bir sonraki alt başlıkta ışımının alındığı kusur merkezinin kuantum-optik özellikleri sistematik olarak verilecek ve KAD deneyi için uygunluğu incelenecektir.

##### a) hBN Kusur Merkezinin İncelenmesi

**Şekil-25(a)**'da  $20 \times 20 \mu m^2$ 'lik bir alanın PL haritası ve hBN yığınının optik görüntüsü (saydam) gösterilmektedir. Optik görüntüden anlaşılacağı gibi yığın halde bulunan hBN katmanının alt tarafında lokalize olmuş bir kusur merkezi bulunmaktadır. Sinyalin PL haritasında bu kadar lokalize olması, söz konusu kusur merkezinin noktasal yapısının bir başka teyididir. İncelediğimiz hBN kusur merkezinin fotoluminesans spektrumu **Şekil-25(b)**'de verilmektedir. Optik uyarım için 633 nm dalga boyunda darbeli lazer kullanılmıştır. ZPL ışması 1.848 eV (671 nm) keskin bir emisyonla sahiptir ve karakteristik fonon ışması 1.683 eV (736 nm) etrafında görülebilmektedir. PL spektru-



**Şekil 25:** a) Işıma alınan bölgenin  $\mu$ PL haritası. Burada örneğin resmi, harita üzerine saydamlaştırılarak eklenmiştir. b) PL spektrumu ve polarizasyona bağlı ZPL-sıfır fonon çizgisi ışıması. PSB-fonon yan çizgisi, Si-Silikon alttaş raman sinyali. c) Lazerin gücüne bağlı ZPL foton sayıları.

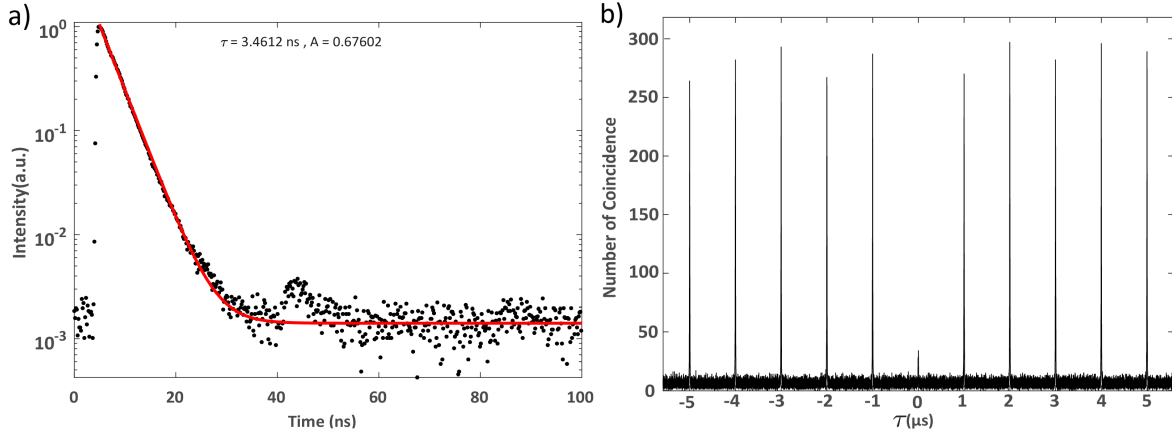
munun bu kadar temiz olması, noktasal kusur merkezinin etrafında başka bir ışığıcı olmadığının bir göstergesidir. Sol üst köşedeki iç resimde, uyarma ve emisyon polarizasyonuna bağlı ışımada şiddet gösterilmiştir. Burada kusur merkezinden elde edilen sıfır-fonon çizgisinin yatay polarizasyona sahip olduğu açıkça görülmektedir. KAD uygulamaları için kritik önem taşıyan parametrelerden bir diğeri de birim zamanda elde edilen bit sayısıdır. Birim zamanda elde edilen bit sayısının maksimize edilebilmesi için, kusur merkezinin doyuma ulaştığı uyarma güçlerinde çalışmak büyük önem taşımaktadır. **Şekil-25(c)**'de, kusur merkezinden elde edilen fotonların 40 MHz darbe frekansında optik uyarım gücüne bağlı değişimi verilmektedir. Doym-güç koşullarında (saturation power) foton sayısı 495.000 cps (counts-per-second) mertebesine ulaşmaktadır.

Kusur merkezinin ışımada dinamikleri, zaman korelasyonlu tek-foton sayma (TCSPC) yöntemi kullanılarak ölçüldü. **Şekil-26(a)** 10 MHz uyarım frekansında alınan böyle bir ölçüm sonucunu göstermektedir. HBN'deki çeşitli kusur merkezleri için tipik olarak 3 ns civarında olan bu süre ([Tran vd. \(2015\)](#)), çalışılan kusur merkezi için 3.46 ns olarak ölçülmüştür. **Şekil-26(b)** ise standart bir HBT interferometresiyle alınmış ikinci mertebe foton-korelasyon ölçümlerini göstermektedir. Bu ölçüm, KAD gösterimi için de planlanan 1 MHz uyarım frekansı koşulunda alınmıştır ve sıfır gecikme zamanındaki güçlü dip değeri, kaynağın gerçek bir tek-foton kaynağı olduğunun göstergesidir. BELde edilen antibunching değeri bir düzeltme yapmadan  $g^2(0) = 0.24$ , arka plan ışımada düzeltmeleri (background correction) yapıldığında ise  $g^2(0) = 0.12$  olarak elde edilmiştir.

Hem iyi bir tek-foton ışığıcısı olması, hem de çok iyi bir polarizasyon bağlılığı göstermesi söz konusu kusur merkezinin KAD için uygun bir aday olduğunu göstermektedir.

### b) hBN Tek-foton Kaynağının KAD Düzenneği ile Entegrasyonu

Bu bölümde daha önce bahsedilmiş olan B92 KAD düzenneğine hBN tek foton kaynağı entegre edilerek iki ayrı bilgisayar (Alice ve Bob) arasında güvenli bir şekilde iletişimi sağlayacak sistem kom-

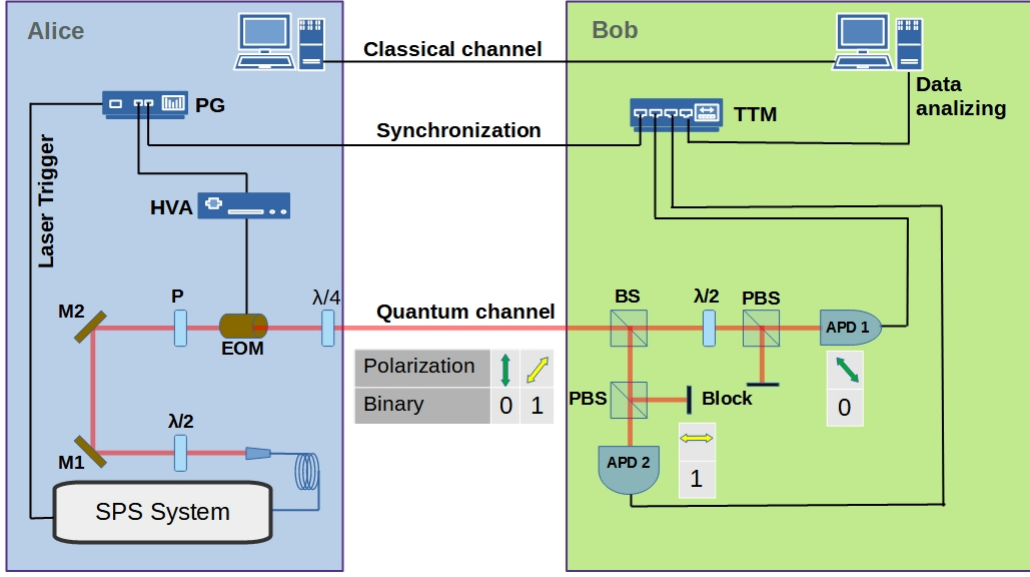


**Şekil 26:** (a) Aday kusur merkezinin filtrelenmiş ZPL ışımından elde edilen ışınma ömrü ve (b) foton-korelasyon ölçümleri.

pakt bir şekilde kurgulanacaktır. Ayrıca sisteme anahtarı kullanıp klasik kanal üzerinden (internet aracılığıyla) veri paylaşmayı sağlayacak iki adet bilgisayar eklenmiştir.

**Şekil-27**'de görüldüğü üzere deney düzeneği iki bölümden oluşmaktadır. Alice kısmındaki darbe sinyal üretici lazeri tetikleyerek tek-fotonların üretilmesi sürecini tetikler. Buradan toplanan tek-fotonlar fiber yardımıyla optik yola yönlendirilir. Bir önceki bölümde vurgulandığı gibi elde edilen tek-fotonlar yatay polarizasyondadır ve yarım dalga-plakası gelen fotonların polarizasyonunu polarizörle (dikey) aynı yönde olacak şekilde döndürmesi için konulmuştur. Elektro-optik modülatör (EOM), gelen voltaja bağlı olarak, üzerinden geçen fotonların polarizasyonunu dikey (0-bit) veya +45 (1-bit) olacak şekilde ayarlar. EOM yüksek voltaja ihtiyaç duyduğundan, darbe sinyali üreticinde çıkan sinyal gerilim yükselticiden geçirilir. Bob kısmında, gelen fotonlar öncelikle ışın ayırıcıdan geçer ve %50 olasılıkla APD-1 veya APD-2 kolundan ilerler. APD-2 kolunda bulunan polarizasyona bağlı ışın ayırıcı (PBS) yatay polarizasyonu geçirir ve dikey bileşen sistemden atılır (engellenir). Eğer gelen fotonların polarizasyonu dikse bu koldan ölçüm alınmaz, eğer +45 (1-bit) polarizasyona sahipse %50 olasılıkla tek foton dedektörüne gider. Daha evvel paylaşıldığı üzere üzere B92 KAD düzeneğinin protokolden kaynaklanan verimliliği %25'dir.

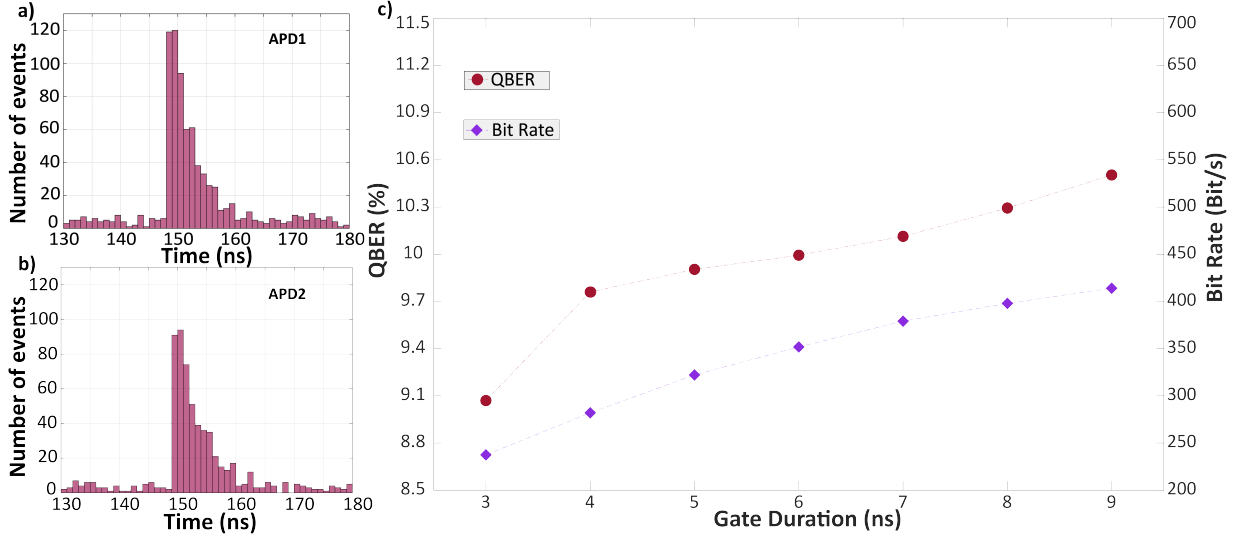
Tek-foton kaynağının hemen çıkışında alınan ölçümlere göre 1 MHz frekansında darbe başına foton sayısı  $\eta = 0.014$  olarak hesaplanmıştır. Optik bileşenlerden kaynaklı kayıplar (fiber, ayna vb.), tek-foton dedektörlerinin ZPL dalga boyunda çalışma verimi, ve sinyalin optik fibere girme verimliliği gibi değerler hesaba katılırsa, KAD sisteminin verimi  $\eta = 0.03$  olmaktadır. Bu rakam, oda sıcaklığında KAD uygulamaları için kullanılan bir başka tek-foton kaynağı elmas nanokristallerin verimliliğine çok yakındır (Leifgen vd. (2014)). Bob kısmında ise B92 protokolünden kaynaklı kayı-



**Şekil 27:** Tek-foton kaynağı entegre edilmiş KAD sisteminin şeması. Darbeli lazer tek foton kaynağı sisteminin (SPS System) içerisinde yer almaktadır. Burada PG-darbe sinyali üretici, HVA-gerilim yükseltici, TTM-sayısal zaman kaydedici, EOM-elektro optik modülatör, P-polarizör, PBS-polarizasyonla bağlı ışın ayırıcı, BS-ışın ayırıcı,  $\lambda/2$ -yarım dalga-plakası,  $\lambda/4$ -çeyrek dalga-plakası ve APD-tek-foton dedektörü anlamına gelmektedirler.

plardan dolayı bu rakam 0.005 değerine düşmektedir. B92 düzeneğinin verimi (%25), optik kayıpları ve dedektör verimi sonrası Bob'un ölçüm aldığı her bir APD darbe başına 0.0004 foton ölçecektir ki bu 1 MHz için 400 foton olacaktır. Kullandığımız tek foton dedektörlerimizin karanlık ölçüm sayıları APD-1 için 1800 APD-2 için 950 dir. Bu yüksek karanlık ölçümler deneyde yüksek hatalara sebep olacaktır ve bunu aşabilmek için TTM üzerinde bir zaman filtreleme (time gating) işlemi yapılmaktadır.

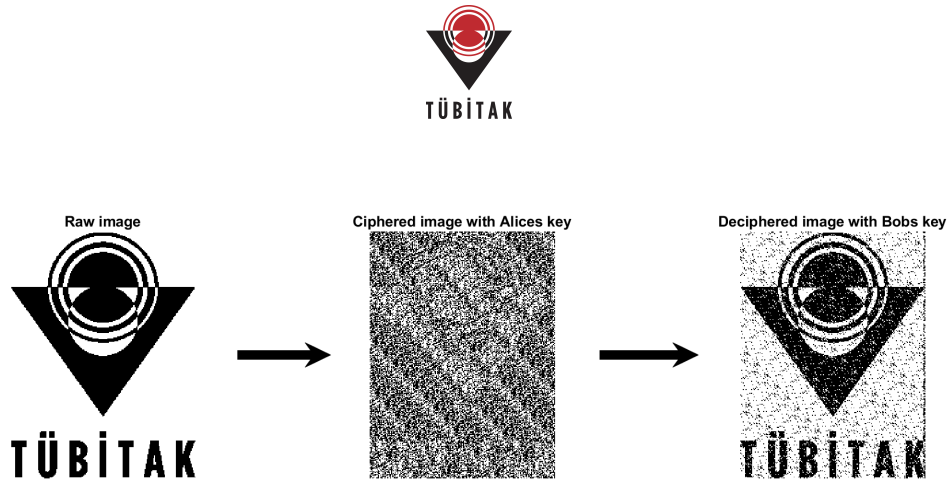
**Şekil-28(a) ve (b)** lazer darbeleri ile APD'lerden alınan ölçümlerin arasında geçen zamanın histogramını göstermektedir. Lazeri sürmek için kullanılan tetikleme sinyali, lazer elektronigine ulaştıktan yaklaşık 148 nanosaniye sonra APD'lerde tek-fotonlar ölçülmeye başlamaktadır. Buradaki 148 nanosaniye, lazer elektroniginin tepki süresi, lazerin kusur merkezine ulaşmak için optik yolda (ve fiberde) aldığı süre, uyarılmış kusur merkezinin ışıma süresi (ışıma ömrü), kusur merkezinden gelen tek-fotonların optik yolda (ve fiberde) aldıkları süre, APD'lerin ölçüm sinyalini kablo üzerinden TTM'e göndermesi için geçen sürelerin toplamını göstermektedir. Görülebildiği üzere, iki şekil de aynı ışıma ömrü ölçümlerindeki davranışı göstermektedirler. Ölçümlerin yoğun olduğu aralığın dışındaki bölgeler ise (148 ns öncesi ve yaklaşık 160 nanosaniye sonrası) tamamen dedektörlerin



**Şekil 28:** İş paketi kapsamında kurulan B92 düzeneği. Bu aşamada foton kaynağı olarak 633 nm dalga boyunda darbeli lazer kullanılmıştır

karanlık ölçümlerinden kaynaklanmaktadır. 148-160 nanosaniye arası ise hem kusur merkezinden gelen tek-fotonlar hem de karanlık ölçümlerden oluşmaktadır. Kuantum bit hata oranının verimli bir şekilde hesaplanması için APD'lerdeki bu sinyallerin doğru bir şekilde zamansal olarak filtrelenmesi (time gating) gerekmektedir. Uzun bir zaman aralığı seçilmesi, karanlık ölçümlerin, gerçek ölçümlere oranını arttıracığı için, hata oranını arttırmaktadır. Kısa bir aralık seçilmesi ise hata oranını düşürürken, aralığın azalmasından dolayı hesap için kullanılan fotonların sayılarının azalmasına dolayısıyla birim zamandaki bit sayısının azalmasına sebep olmaktadır. Optimum zaman aralığının bulunması amacıyla farklı filtreleme süreleri kullanılarak yapılan analiz sonuçları **Şekil-28(c)**'de gösterilmektedir. EElde edilen en iyi sonuçlara göre kuantum bit hata oranı %8.89 iken birim zamandaki bit sayısı 249 *bit/s* olarak gözlenmiştir. Zaman aralığının yaklaşık 9 ns merteye olduğu durumda ise QBER % 10.5 olurken bit oranı ise yaklaşık 420 bps olmaktadır.

**Şekil-29**'te oluşturulan anahtar kullanılarak örnek bir resim şifrelenip (XOR metodu ile) Bob'a klasik kanaldan internet yoluyla gönderilmiştir. Solda yer alan resim Alice'in şifreleyeceği orjinal hali, ortadaki resim şifrelenmiş ve anahtara sahip olmayan birinin göreceği ve sağda yer alan resim ise Bob'un elindeki anahtarla açtığına gördüğü resimdir. Alice ve Bob'un resimleri arasındaki farklılık tamamen hata oranından kaynaklanmaktadır. Eğer kuantum bit hata oranı sıfır olsaydı iki resim birebir aynı olması beklenirdi. Bir diğer nokta ise ortadaki resmin az da olsa belirgin olması. Bunun sebebi oluşturulan anahtarın yeterince uzun olmamasıdır. Sistemi daha yüksek darbe frekanslarına



**Şekil 29:** Oluşturulan anahtar kullanılarak şifrelenmiş (ortada) ve Bob tarafından açılmış (sağda) olan resim (solda).

çıkarmak, tek-foton kaynağının efektifliğini arttırmak veya optik sistemin kayıplarını azaltmak birim zamanda bit sayısını arttıracığından, birim zamanda şifrelenip çözülecek veri de artacaktır.

### 3. TEK-FOTON MERTEBESİNDE EŞ-EVRE ÖLÇÜMÜ

#### 3.1. Michelson İnterferometresi Kurulumu

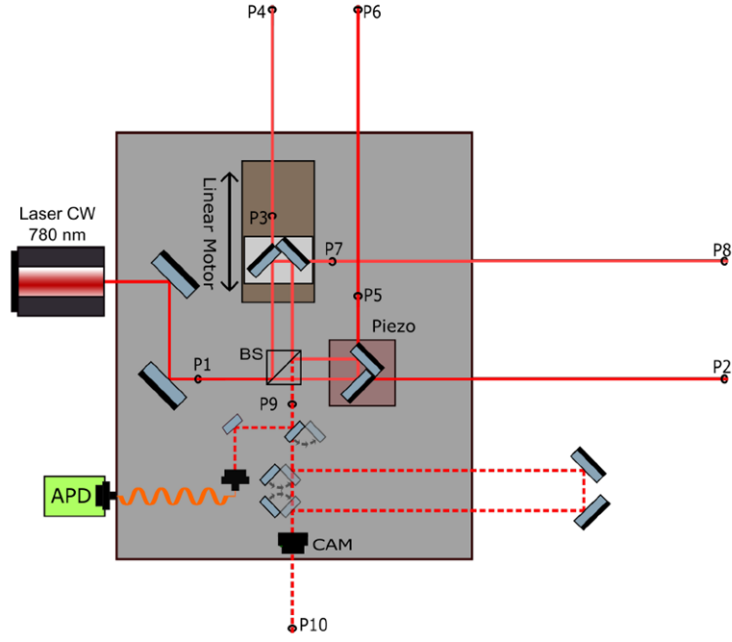
Proje kapsamında yapılacak çalışmalardan bir diğeri de hBN kusur merkezlerinden elde edilen tek-foton ışımalarının eş-evre özelliklerinin incelenmesiydi. Bu amaçla tek-foton seviyesinde ölçüm yapabilecek bir Michelson interferometresi kurulması ve hBN kusur merkezlerinin düşük sıcaklıklara soğutularak eş-evre ölçümleri yapılması planlanmaktaydı (Sontheimer vd. (2017)). Ancak, proje süresince krayostat teslim edilemediğinden düşük sıcaklıklara inmek mümkün olmadı. Öte yandan, eş-evre ölçümleri için gerekli olan Michelson interferometresinin kurulumu ve testleri yapılarak hBN örnekler ile ölçüme hazır hale getirildi. Bu kısımda, interferometrenin kurulumu ve test sonuçları paylaşılacaktır.

**Şekil-30** kurulumu yapılmak istenen Michelson interferometresi şemasını göstermektedir. İnterferometre ilk olarak yüksek eş-evre süresine sahip 780 nm dalga boyunda bir lazer kullanılarak kurulmuştur. İnterferometreye gönderilen ışın 50/50 oranına sahip bir ışın ayırıcıdan ikiye ayrılır ve aynı şiddette yansıyan/iletelen sinyaller iki ayna ile ışın ayırıcıya geri gönderilerek girişime uğramaları sağlanır. Girişimin maksimum düzeyde gözlemlenebilmesi interferometrenin kollarının aynı uzunlukta olmalarına ve çok hassas bir optik hizalamaya bağlıdır. Girişim için optik kollardan bir tanesi bir piezo sehpa üzerine yerleştirilmiştir ve bu aynanın dalga boyundan çok daha küçük ölçeklerde hareket etmesi ile girişim desenler elde edilmektedir. **Şekil-31** kurulumu yapılan Michelson interferometresinin optik masa üzerindeki mevcut halini göstermektedir.

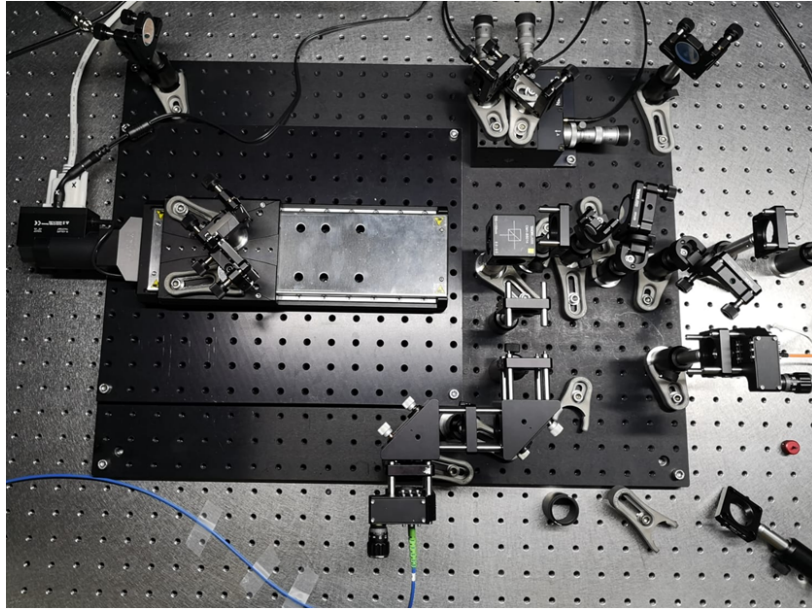
Eş-evre ölçümleri için kullanılması planlanan Michelson interferometresinin optik hizalanması çok kritik bir önem taşıdığı için, ölçümler sırasında sisteme (interferometre, optik masa, tek-foton dedektörleri vs ) mümkün olduğunca az müdahale edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple sistemin tamamen bilgisayar arayüzü ile kontrol edilerek, otomatize edilmesi büyük önem taşımaktadır. **Şekil-32** Bu amaçla geliştirilmiş olan Labview arayüzünü göstermektedir.

Labview arayüzü ile hem step-motor hem de piezo-elektrik motorlar ayrı ayrı kontrol edilebilmekte ve interferometrenin kalibrasyonu hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Program farklı renklerle işaretlenmiş 4 kısımdan oluşmaktadır,

- **Mavi kısım**, interferometrenin kolları arasındaki yol farkının kaba (büyük aralıklarla) kontrolünü sağlayan step-motoru kontrol etmektedir.
- **Kırmızı kısım**, tek-foton dedektörlerinin bağlı olduğu zaman etiketleyici modülün (TTM-time tagging module) ölçüm parametrelerini kontrol etmektedir.



**Şekil 30:** Proje kapsamında kurulumu yapılan Michelson interferometresinin şematik gösterimi. İnterferometrenin bir kolunda kaba hareketleri sağlamak için step-motorlu hareket sehpası, diğer kolunda ise hassas hareketleri sağlamak için piezo-elektrik motor bulunan hareket sehpası bulunmaktadır.



**Şekil 31:** Kurulumu yapılan Michelson interferometresinin mevcut hali.

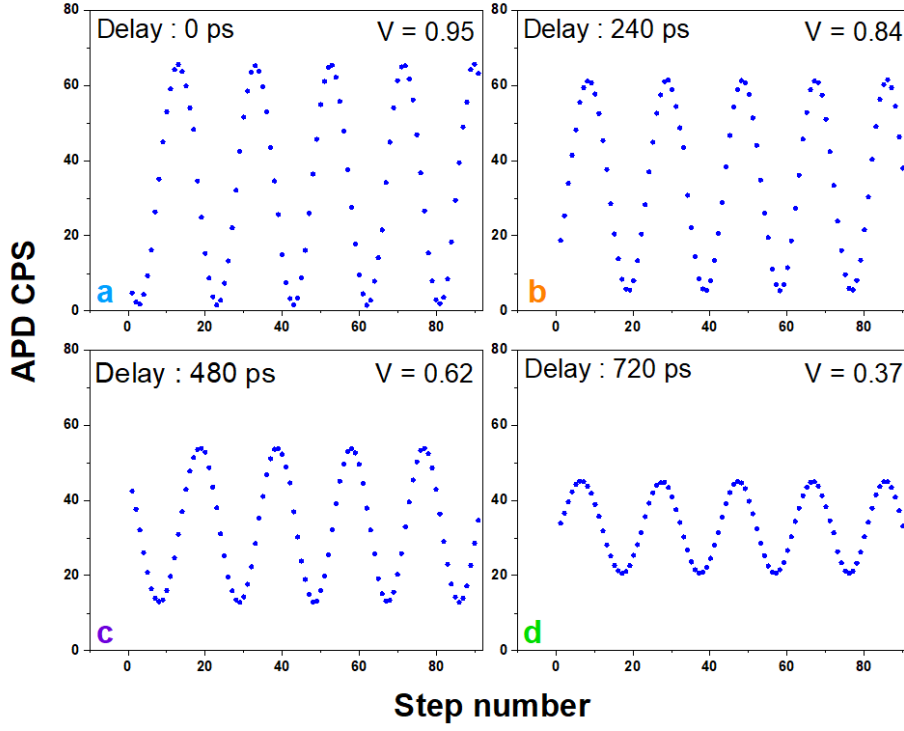


Şekil 32: Michelson interferometresinin otomatize edilebilmesi için geliştirilen Labview arayüzü.

- **Yeşil kısım**, hassas hareketlerin kontrolünü yapan piezoelektrik hareket sehpasının kontrolünü yapmaktadır.
- **Turuncu kısım**, eş-evre ölçümünü başlatarak her kaba hareket (step-motor) sonrasında hassas tarama (piezoelektrik hareket sehpası) yaparak APD’lerde alınan ölçümleri kayıt ederek seçili uzaklıklarda görünürlüğü (visibility) hesaplar ve kayıt eder.

### 3.2. Lazer ile Eş-evre Ölçümü

Bu kısımda 780 nm dalga boyu ayarlanabilen lazer ile yapılmış olan eş-evre ölçümlerinin sonuçları verilecektir. **Şekil-33** interferometrenin iki kolu arasındaki zaman farklarının sırasıyla 0 ps ( $\Delta x = 0$  mm), 240 ps ( $\Delta x = 72$  mm), 480 ps ( $\Delta x = 144$  mm), ve 720 ps ( $\Delta x = 236$  mm) olduğu durumlardaki görünürlük ölçümlerini göstermektedir. İdeal olarak zaman farkının 0 ps olduğu durumda iki koldan gelen ışınların tamamen yapıcı girişim yapması ve dolayısıyla görünürlüğün 1.00 olması gerekirken, optik yoldaki hizalamalardaki zorluklardan kaynaklı olarak görünürlük 0.952 çıkmaktadır. Görünürlük, 720 ps’lik optik yol farkından (236 mm) kaynaklı gecikme süresinde, 0.952 değerinden 0.370 değerine kadar düşmektedir.

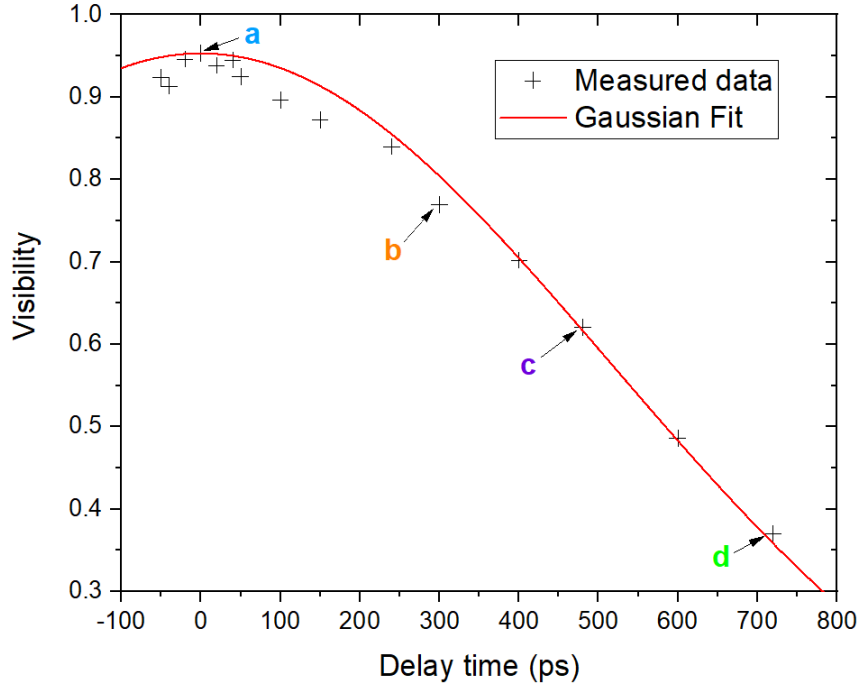


**Şekil 33:** Örnek olarak seçilen a)  $\Delta x = 0$  mm, b)  $\Delta x = 72$  mm, c)  $\Delta x = 144$  mm, ve d)  $\Delta x = 236$  mm yol farklarındaki görünürlük ölçümleri.

**Şekil-34**, yol farkından kaynaklı gecikme sürelerinin -50 pikosaniyeden, +720 pikosaniye arasında taranarak alınan görünürlük ölçümlerini göstermektedir. Kırmızı çizgi, elde edilen veriler üzerine uygulanan

$$g^{(1)}(\tau) = A \exp\left(-\frac{\pi}{2}\left(\frac{\tau}{\tau_c}\right)^2\right) \quad (8)$$

Gaussian fonksiyonun fit edilmesi ile elde edilmiştir. Buradaki A maksimum görünürlük değerini,  $\tau_c$  eş-evre süresini göstermektedir ve 780 nm lazer için fit fonksiyonundan çıkarılan  $\tau_c$  değeri 910 ps bulunmuştur.



**Şekil 34:** 780 nm lazer ile alınan görünürlük ölçümleri. Kırmızı ile gösterilen çizgi, 8'deki Gaussian fonksiyonun fit edilmesi ile elde edilmiştir.

Kullanılan 780 nm sürekli-dalga (CW) lazerin eş-evre süresi, kurulan interferometrenin ölçebileceği eş-evre süresinin çok üstünde olmasına rağmen, optik yoldaki hizalama problemlerinden ve mekanik etkilerden dolayı ölçülen 910 ps eş-evre değeri, lazerin gerçek eş-evre süresinin çok altında çıkmıştır, ancak hBN içerisinde bulunan kusur merkezleri için literatürden bilinen eş-evre süreleri yaklaşık olarak 80 ps (krajojenik sıcaklıklarda) mertebelerinde olduğundan dolayı (Sonthheimer vd. (2017)), kurulan Michelson interferometresi doğru bir eş-evre ölçümü yapabilmek için yeterli çözünürlüktedir.



TÜBİTAK

## 4. SONUÇ

Bu projede hBN içerisinde bulunan optik-aktif kusur merkezleri ile açık-hava KAD gösterimi çalışmaları yapıldı. Geniş bant aralığına sahip hBN farklı tiplerde kusur merkezleri bulundurur ve optik aktif olabilen bu kusur merkezleri geniş spektral aralıkta tek-foton mertebesinde ışımaya yapabilmektedir. Proje kapsamında yığınsal hBN yapılar içerisinde çok sayıda optik aktif kusur merkezi belirlendi ve KAD için kullanılabilir olanların temel optik özelliklerin karakterize edildi. KAD protokolü olarak ise tek-fotonların polarizasyonuna bağlı BB84 protokolü tercih edildi. Bu protokole göre aynı polarizasyonda üretilen ardışık tek fotonların polarizasyonları bir elektro-optik modulatör yardımıyla iki farklı polarizasyon tabanında dört farklı polarizasyon durumuna kontrollü bir şekilde dönüştürülür. Ancak, protokol gereği kullanılması gereken benzer özellikte 4 tek-foton dedektörünün tedarik edilemesinden dolayı iki polarizasyon durumu ve iki tek-foton dedektörü kullanılan B92 protokolüne geçildi. Belirlenen KAD sisteminin kurulumu için öncelikle tek-foton ışımaya yakın dalgaboylarında ışılan darbeleri bir lazer kullanılarak sistemin optik hizalanmaları ve kontrol yazılımları yapıldı. Zayıflatılmış lazer (1 MHz darbe frekansı) ile çalıştırılan KAD sisteminde %3.75 kuantum bit hata oranı ve yaklaşık 300 kbps anahtar üretim oranı elde edildi. Aynı ölçümler daha önce karakterasyonu yapılan hBN kusur merkezi ile tekrarlandı. Bu ölçümler için kullanılan hBN kusur merkezi 633 nm darbeleri bir lazer ile (1 MHz) uyarıldı ve 671 nm dalgaboyunda elde edilen sıfır-fonon çizgisi ışımalarının tek-foton mertebesinde olduğu Hanbury-Brown ve Twiss interferometresi kullanılarak gösterildi ve antibunching değeri  $g^2(0) = 0.12$  olarak ölçüldü. Bu kusur merkezi ile yapılan KAD ölçümlerinde yaklaşık % 9 kuantum bit hata oranı ve 250 bit/s bit sayısı elde edildi. Tek-fotonlar ile yapılan KAD ölçümlerindeki değerlerin zayıflatılmış lazere kıyasla daha kötü olmasının tek sebebi 1 MHz optik uyarım koşullarında elde edilen tek-foton sayısının düşük olmasıdır. Öte yandan, hBN kusur merkezlerinin tipik ışımaya ömrü yaklaşık 3 ns mertebesinde ve bu ışınımlar çok daha yüksek frekanslarda uyarılabilirler. Proje kapsamında kullanılan elektro-optik modulatör en fazla 1 MHz oranında çalıştığı için KAD gösterimleri bu hızda yapılmıştır. Daha hızlı modulatörlerin kullanılması durumunda hBN kusur merkezlerinin KAD sistemleri için ideal tek-foton kaynağı olarak kullanılabilmesi sonucuna ulaşılmıştır.

Projenin ikinci kısmında ise, hBN kusur merkezlerinden elde edilen ışımaların eş-evre özelliklerinin anlaşılması için gerekli olan Michelson interferometresinin kurulumu çalışmaları yapıldı ve zayıflatılmış bir sürekli lazer ile sistemin optik hizalanmaları ve otomasyon yazılımları yapıldı. Ancak, proje sürecinde hBN kusur merkezleri krayojenik sıcaklıklara soğutulamadığı için bu yapılar ile eş-evre ölçümleri yapılamadı. Yakın zamanda kurulacak olan krayostat ile bu ölçümlerin yapılması planlanmaktadır.

## Referanslar

- Aharonovich, I., & Neu, E. 2014. “Diamond nanophotonics”. *Advanced Optical Materials*, 2(10), 911–928.
- Basché, T., Moerner, W. E., Orrit, M., & Talon, H. 1992. “Photon antibunching in the fluorescence of a single dye molecule trapped in a solid”. *Physical Review Letters*, 69(10), 1516–1519.
- Bennett, C. H. 1992. “Quantum cryptography using any two nonorthogonal states”. *Physical Review Letters*, 68(21), 3121–3124.
- Bennett, C. H., & Brassard, G. 1984. “Quantum cryptography: public key distribution and coin tossing”. In *IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing*, (pp. 175–179).
- Boretti, A., & Rosa, L. 2016. “Latest Advances in the Generation of Single Photons in Silicon Carbide”. *Technologies*, 4(2), 16.
- Bourrellier, R., Meuret, S., Tararan, A., Stéphan, O., Kociak, M., Tizei, L. H. G., & Zobelli, A. 2016. “Bright UV single photon emission at point defects in h-BN”. *Nano Letters*, 16(7), 4317–4321.
- Cassabois, G., Valvin, P., & Gil, B. 2016. “Hexagonal boron nitride is an indirect bandgap semiconductor”. *Nature photonics*, 10(4), 262–267.
- Castellanos-Gomez, A. 2016. “Why all the fuss about 2D semiconductors?” *Nature Photonics*, 10(4), 202–204.
- Castelletto, S., Johnson, B. C., Ivády, V., Stavrias, N., Umeda, T., Gali, A., & Ohshima, T. 2013. “A silicon carbide room-temperature single-photon source”. *Nature Materials*, 13(2), 151–156.
- Chejanovsky, N., Kim, Y., Zappe, A., Stuhlhofer, B., Taniguchi, T., Watanabe, K., Dasari, D., Finkler, A., Smet, J. H., & Wrachtrup, J. 2017. “Quantum Light in Curved Low Dimensional Hexagonal Boron Nitride Systems”. *Scientific Reports*, 7(1), 1–14.
- Chejanovsky, N., Rezai, M., Paolucci, F., Kim, Y., Rendler, T., Rouabeh, W., Fávaro de Oliveira, F., Herlinger, P., Denisenko, A., Yang, S., Gerhardt, I., Finkler, A., Smet, J. H., & Wrachtrup, J. 2016. “Structural Attributes and Photodynamics of Visible Spectrum Quantum Emitters in Hexagonal Boron Nitride”. *Nano Letters*, 16(11), 7037–7045.
- Chu, Y. 2015. *Quantum optics with atom-like systems in diamond*. Ph.D. thesis.
- Doherty, M. W., Manson, N. B., Delaney, P., Jelezko, F., Wrachtrup, J., & Hollenberg, L. C. L. 2013. “The nitrogen-vacancy colour centre in diamond”. *Physics Reports*, 528(1), 1–45.
- Duan, X., Wang, C., Pan, A., Yu, R., & Duan, X. 2015. “Two-dimensional transition metal dichalcogenides as atomically thin semiconductors: opportunities and challenges”. *Chem. Soc. Rev.*, 44(24), 8859–8876.



- Dutt, M. V. G., Childress, L., Jiang, L., Togan, E., Maze, J., Jelezko, F., Zibrov, a. S., Hemmer, P. R., & Lukin, M. D. 2007. “Quantum Register Based on Individual Electronic and Nuclear Spin Qubits in Diamond”. *Science*, 316(5829), 1312–1316.
- Fuchs, F., Stender, B., Trupke, M., Simin, D., Pflaum, J., Dyakonov, V., & Astakhov, G. V. 2015. “Engineering near-infrared single-photon emitters with optically active spins in ultrapure silicon carbide”. *Nature Communications*, 6(May), 7578.
- Gisin, N., Ribordy, G., Tittel, W., & Zbinden, H. 2002. “Quantum cryptography”. *Reviews of Modern Physics*, 74(1), 145–195.
- He, Y.-M., Clark, G., Schaibley, J. R., He, Y., Chen, M.-C., Wei, Y.-J., Ding, X., Zhang, Q., Yao, W., Xu, X., Lu, C.-Y., & Pan, J.-W. 2015. “Single quantum emitters in monolayer semiconductors”. *Nature Nanotechnology*, 10(6), 497–502.
- Jungwirth, N. R., Calderon, B., Ji, Y., Spencer, M. G., Flatté, M. E., & Fuchs, G. D. 2016. “Temperature Dependence of Wavelength Selectable Zero-Phonon Emission from Single Defects in Hexagonal Boron Nitride”. *Nano Letters*, 16(10), 6052–6057.
- Kianinia, M., Regan, B., Tawfik, S. A., Tran, T. T., Ford, M. J., Aharonovich, I., & Toth, M. 2017. “Robust Solid-State Quantum System Operating at 800 K”. *ACS Photonics*, 4(4), 768–773.
- Kiraz, A., Ehrl, M., Hellerer, T., Müstecaplıođlu, O. E., Bräuchle, C., & Zumbusch, A. 2005. “Indistinguishable photons from a single molecule”. *Physical Review Letters*, 94(22), 1–4.
- Koehl, W. F., Buckley, B. B., Heremans, F. J., Calusine, G., & Awschalom, D. D. 2011. “Room temperature coherent control of defect spin qubits in silicon carbide”. *Nature*, 479(7371), 84–87.
- Koperski, M., Nogajewski, K., Arora, A., Cherkez, V., Mallet, P., Veullen, J.-Y., Marcus, J., Kossacki, P., & Potemski, M. 2015. “Single photon emitters in exfoliated WSe2 structures”. *Nature Nanotechnology*, 10(6), 503–506.
- Kubota, Y., Watanabe, K., Tsuda, O., & Taniguchi, T. 2007. “Deep Ultraviolet Light – Emitting Hexagonal Boron Nitride Synthesized at Atmospheric Pressure”. *Science*, 317(August), 932–935.
- Kurtsiefer, C., Mayer, S., Zarda, P., & Weinfurter, H. 2000. “Stable solid-state source of single photons”. *Physical Review Letters*, 85(2), 290–293.
- Ladd, T. D., Press, D., De Greve, K., McMahon, P. L., Friess, B., Schneider, C., Kamp, M., Höfling, S., Forchel, A., & Yamamoto, Y. 2010. “Pulsed nuclear pumping and spin diffusion in a single charged quantum dot”. *Physical Review Letters*, 105(10), 1–4.
- Leifgen, M., Schröder, T., Gädeke, F., Riemann, R., Métillon, V., Neu, E., Hepp, C., Arend, C., Becher, C., Lauritsen, K., & Benson, O. 2014. “Evaluation of nitrogen- and silicon-vacancy defect centres as single photon sources in quantum key distribution”. *New Journal of Physics*, 16.



- Levendorf, M. P., Kim, C.-J., Brown, L., Huang, P. Y., Havener, R. W., Muller, D. a., & Park, J. 2012. "Graphene and boron nitride lateral heterostructures for atomically thin circuitry". *Nature*, 488(7413), 627–632.
- Lienhard, B., Schröder, T., Mouradian, S., Dolde, F., Tran, T. T., Aharonovich, I., & Englund, D. 2016. "Bright and photostable single-photon emitter in silicon carbide". *Optica*, 3(7), 768.
- Lodahl, P., Mahmoodian, S., & Stobbe, S. 2015. "Interfacing single photons and single quantum dots with photonic nanostructures". *Reviews of Modern Physics*, 87(2), 347–400.
- Mak, K. F., & Shan, J. 2016. "Photonics and optoelectronics of 2D semiconductor transition metal dichalcogenides". *Nature Photonics*, 10(4), 216–226.
- Martínez, L. J., Pelini, T., Waselowski, V., Maze, J. R., Gil, B., Cassabois, G., & Jacques, V. 2016. "Efficient single photon emission from a high-purity hexagonal boron nitride crystal". *Physical Review B*, 94(12), 121405.
- Michler, P., Kiraz, a., Zhang, L., Becher, C., Hu, E., & Imamoglu, a. 2000. "Laser emission from quantum dots in microdisk structures". *Applied Physics Letters*, 77(2), 184.
- Nauerth, S., Moll, F., Rau, M., Fuchs, C., Horwath, J., Frick, S., & Weinfurter, H. 2013. "Air-to-ground quantum communication". *Nature Photonics*, 7(5), 382–386.
- Neitzke, O., Morfa, A., Wolters, J., Schell, A. W., Kewes, G., & Benson, O. 2015. "Investigation of line width narrowing and spectral jumps of single stable defect centers in ZnO at cryogenic temperature". *Nano Letters*, 15(5), 3024–3029.
- Neu, E., Hepp, C., Hauschild, M., Gsell, S., Fischer, M., Sternschulte, H., Steinmüller-Nethl, D., Schreck, M., & Becher, C. 2013. "Low-temperature investigations of single silicon vacancy colour centres in diamond". *New Journal of Physics*, 15(4), 043005.
- O'Brien, J. L., Furusawa, A., & Vučković, J. 2009. "Photonic quantum technologies". *Nature Photonics*, 3(12), 687–695.
- Rau, M., Heindel, T., Unsleber, S., Braun, T., Fischer, J., Frick, S., Nauerth, S., Schneider, C., Vest, G., Reitzenstein, S., Kamp, M., Forchel, A., Höfling, S., & Weinfurter, H. 2014. "Free space quantum key distribution over 500 meters using electrically driven quantum dot single-photon sources - A proof of principle experiment". *New Journal of Physics*, 16.
- Schmitt-Manderbach, T., Weier, H., Fürst, M., Ursin, R., Tiefenbacher, F., Scheidl, T., Perdigues, J., Sodnik, Z., Kurtsiefer, C., Rarity, J. G., Zeilinger, A., & Weinfurter, H. 2007. "Experimental demonstration of free-space decoy-state quantum key distribution over 144 km". *Physical Review Letters*, 98(1), 1–4.
- Shields, A. J. 2007. "Semiconductor quantum light sources". *Nature Photonics*, 1(4), 215–223.



- Sontheimer, B., Braun, M., Nikolay, N., Sadzak, N., Aharonovich, I., & Benson, O. 2017. "Photodynamics of quantum emitters in hexagonal boron nitride revealed by low-temperature spectroscopy". *Physical Review B*, 96(12), 121202.
- Srivastava, A., Sidler, M., Allain, A. V., Lembke, D. S., Kis, A., & Imamoglu, A. 2015a. "Valley Zeeman effect in elementary optical excitations of monolayer WSe<sub>2</sub>". *Nature Physics*, 11(2), 141–147.
- Srivastava, A., Sidler, M., Allain, A. V., Lembke, D. S., Kis, A., & Imamoglu, A. 2015b. "Optically active quantum dots in monolayer WSe<sub>2</sub>". *Nature Nanotechnology*, 10(6), 491–496.
- Tonndorf, P., Schmidt, R., Schneider, R., Kern, J., Buscema, M., Steele, G. a., Castellanos-Gomez, A., van der Zant, H. S. J., Michaelis de Vasconcellos, S., & Bratschitsch, R. 2015. "Single-photon emission from localized excitons in an atomically thin semiconductor". *Optica*, 2(4), 347.
- Tran, T. T., Bray, K., Ford, M. J., Toth, M., & Aharonovich, I. 2015. "Quantum emission from hexagonal boron nitride monolayers". *Nature Nanotechnology*, 11(1), 37–41.
- Tran, T. T., Elbadawi, C., Totonjian, D., Lobo, C. J., Grosso, G., Moon, H., Englund, D. R., Ford, M. J., Aharonovich, I., & Toth, M. 2016a. "Robust Multicolor Single Photon Emission from Point Defects in Hexagonal Boron Nitride". *ACS Nano*, 10(8), 7331–7338.
- Tran, T. T., Kianinia, M., Bray, K., Kim, S., Xu, Z.-q., Gentle, A., Sontheimer, B., Bradac, C., & Aharonovich, I. 2017. "Nanodiamonds with photostable, sub-gigahertz linewidths quantum emitters". arXiv:1705.06810, (pp. 1–11).
- Tran, T. T., Zachreson, C., Berhane, A. M., Bray, K., Sandstrom, R. G., Li, L. H., Taniguchi, T., Watanabe, K., Aharonovich, I., & Toth, M. 2016b. "Quantum Emission from Defects in Single-Crystalline Hexagonal Boron Nitride". *Physical Review Applied*, 5(3), 2–9.
- Weber, J. R., Koehl, W. F., Varley, J. B., Janotti, A., Buckley, B. B., Van de Walle, C. G., & Awschalom, D. D. 2010. "Quantum computing with defects." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(19), 8513–8.
- Weber, J. R., Koehl, W. F., Varley, J. B., Janotti, A., Buckley, B. B., Van De Walle, C. G., & Awschalom, D. D. 2011. "Defects in SiC for quantum computing". *Journal of Applied Physics*, 109(10), 1–5.