

## Atomik Sensörler ile Çınlama Odalarının Yüksek Seviyeli Elektromanyetik Alan Şiddetlerinde Deneysel Olarak Doğrulanması Experimentally Verification of Reverberation Chambers at the High Level Electromagnetic Field Strengths via Atomic Sensors

Mustafa Çetintas<sup>1</sup>, Çağlar Aslan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye

mustafa.cetintas@tubitak.gov.tr, caglar.aslan@tubitak.gov.tr

### Öz

Bu çalışmada ilk defa elektromanyetik çınlama odalarında oluşturulan yüksek seviyeli düzgün elektrik alanın teorik değerinin, lazer-atom-mikrodalga etkileşimine dayanan bir Cs atomik sensör sistemi kullanılarak deneysel olarak doğrulanması araştırılmıştır. Çalışma kapsamında lazer ışınının frekansı Cs atomlarının  $D_2$  enerji seviyesindeki  $6S_{1/2} (F=4) \leftrightarrow 6P_{3/2} (F=4)$  enerji geçişine kilitlenmiştir. İlk olarak çınlama odası içinde oluşturulan homojen 9,192 GHz frekansındaki mikrodalga alan ile  $6S_{1/2} (F=3) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4)$  geçişinde DROR (çift radyo optik rezonans) elde edilmiştir. Ardından DROR rezonansının genliğinin çınlama odası içerisinde oluşturulan homojen ve yönden bağımsız mikrodalga alana bağlılığı araştırılmış, daha sonra ise DROR rezonansının DC manyetik alan altında Zeeman alt seviyeleri gözlenmiştir. Bunlardan  $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$   $\pi$ -geçişindeki merkez Zeeman rezonansının bant genişliği ve genliğinin çınlama odası içerisinde oluşturulan homojen ve yönden bağımsız mikrodalga alana bağlılığı araştırılmıştır. Çalışma sonucunda çınlama odalarının yüksek seviyeli elektromanyetik alan şiddetlerinde deneysel olarak doğrulanmasında yeni bir sensör olarak kullanılabilmesinin temelleri atılmıştır.

Anahtar kelimeler: Çınlama odaları, lazer-atom-mikrodalga etkileşimi, atomik sensör.

### Abstract

In this study, for the first time, it was investigated that the uniform high level theoretical electrical field value generated in electromagnetic reverberation chambers was experimentally verified using a Cs atomic sensor system based on laser-atom-microwave interaction. The scope of the work, the frequency of the laser is locked to the  $6S_{1/2} (F=4) \leftrightarrow 6P_{3/2} (F=4)$  energy transition in the  $D_2$  line of Cs atomic transition. The DROR (double radio optical resonance) resonance was obtained by applying a high level uniform microwave field at the frequency of 9,192 GHz in reverberation chamber corresponding to  $6S_{1/2} (F=3) \leftrightarrow 6P_{3/2} (F=4)$  energy transition. Zeeman sub-levels of DROR resonance were observed under the DC magnetic field and resonance on the  $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$   $\pi$ -transition were investigated. The dependence of the bandwidth and amplitude of the Zeeman resonance at  $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$   $\pi$ -transition and also amplitude of the DROR resonance were investigated as a function of applied uniform and isotropic high-level microwave field strength in reverberation chamber. As a result of the study, it showed that use the atomic sensors as a new sensor in experimental verification of high electromagnetic field strengths in reverberation chambers.

Keywords: Reverberation chambers, laser-atom-microwave interaction, atomic sensor.

## 1. Giriş

Çınlama odaları girişlerine uygulanan düşük güçteki değerleri, oda boyutlarını, anten parametrelerini kullanarak içerisinde yüksek seviyeli ve düzgün (uniform field) elektromanyetik alan oluşturabilmektedirler. Oda içerisinde belirlenen test alanı içinde oluşturulan alanın düzgünlüğü ve düşük giriş gücü avantajı dikkate alındığında, çınlama odaları EMC/EMI testleri ve bilimsel çalışmalar için önemli bir test ortamıdır. Çınlama odaları içinde oluşturulması hedeflenen teorik elektromanyetik alanın değeri ve düzgünlüğü istatistiksel yöntemlerle belirlenmektedir. İstatistiksel yöntem, çınlama odalarının düşük seviyelerde (örneğin 20 V/m - 100 V/m arasında) gerçekleştirilen bir kaç ön ölçüm ve kalibrasyondan elde edilen kalibrasyon faktörlerinin, ulaşılmak istenen yüksek seviyeli elektromanyetik alanın hesaplanmasında kullanılmasına dayanmaktadır. Literatürde bahsedilen kalibrasyon ve ölçüm prosedürleri, [1-4]'de bazıları verilen standartlar tarafından tanımlanmıştır. Fakat bu standartlar temelde aynı kalibrasyon yöntemlerine dayansa da test ve ölçüm sonuçlarının analizi aşamasında farklı sonuçlar verebilmektedir [5].

Çınlama odalarının kalibrasyonu elektrik alan problemleri yardımıyla düşük elektrik alan seviyelerinde gerçekleştirilir. Elektrik alan problemlerinin algılayabileceği alan şiddetinin üst sınırı, test ölçümleri esnasında çınlama odası içinde oluşturulan yüksek seviyeli elektromanyetik alan şiddetinin altında olduğundan, odanın kalibrasyon ölçümleri tamamlandıktan sonra elektrik alan problemleri oda içerisinden çıkarılmaktadır.

Çınlama odalarının kalibrasyon ölçümlerinden elde edilen kalibrasyon faktörleri kullanılarak Test Altındaki Cihaz'ın (TAC) bağımsızlık ölçümleri esnasında odanın içerisinde ne kadar alan oluşacağını hesaplamak mümkün olmaktadır. Bu yarı teorik elektrik alan değeri test esnasında uygulanan yüksek seviyeler nedeniyle elektrik alan probunun odadan çıkarılmasıyla gerçek zamanlı ve deneysel olarak doğrulanamamaktadır. Buradan yola çıkarak odanın kalibrasyonunun yanında TAC'ın test ölçümleri esnasında da oda içinde bulunabilen, yüksek seviyeli elektromanyetik alan şiddetini anlık olarak algılayabilen bir atomik sensör yardımı ile teorik alan şiddetinin deneysel ve gerçek zamanlı olarak doğrulanması hedeflenmiştir.

Son yıllarda çeşitli araştırma projelerine konu olan son teknoloji atomik sensörler hızla gelişmektedir [6-8]. Ayrıca bazı alanlarda pratik olarak kullanılmaya başlanmıştır [9,10]. BIPM (Uluslararası Ölçüler ve Ağırlıklar Bürosu)'in bu tür araştırmaları stratejik hedefleri arasına alması ve geleneksel CCEM (Elektrik ve Manyetizma Alanında Temsilciler Komitesi) toplantısında aldığı kararlar ile raporlarında yer vermesi bu alanlardaki gelişmeleri desteklediğini göstermektedir. Son gelişmelere göre ise atomik sensörlerin elektromanyetik test ve kalibrasyon ortamlarında da (TEM cell, Anechoic Chamber, Reverberation Chamber vb.) ölçülmesine geçilmesi planlanmaktadır [11,12].

Atomun bir dış mikrodalga alan altında nasıl tepki verdiği ve bir sensör olarak kullanıldığında hangi özelliklerinin ön plana çıktığına dair önemli deneysel çalışmalar [13-16]'da verilmiştir. Ancak verilen bu çalışmaların DROR (double radio optical resonance) olarak bilinen çift radyo optik rezonanslarını çalıştıran büyük bir kısmının konseptlerine bakıldığında, uzak alanda oluşturulan

mikrodalga elektromanyetik alan şiddeti ile DROR rezonansının genliği arasındaki ilişki çalışılmıştır.

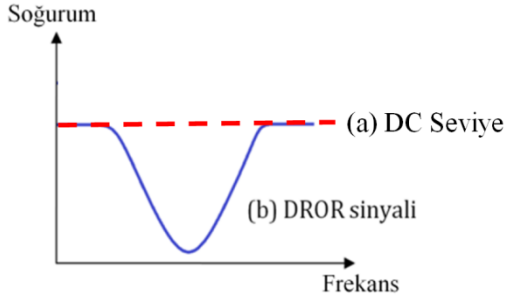
Bu çalışma ile ilk defa bir atomik sensörün çınlama odalarında oluşturulan yüksek seviyeli mikrodalga elektromanyetik alanların ölçümünde kullanılması incelenmiştir. Bu amaçla öncelikle atomik sensörün, mikrodalga etkileşiminden doğan çift radyo optik rezonansları ile DC manyetik alan altında oluşan Zeeman ayrışmaları çınlama odasında üretilen mikrodalga alan ile görüntülenmiştir. Daha sonra çınlama odası içinde bu rezonanslardan DROR rezonansının genlik ve Zeeman rezonansının genlik ve bant genişliği ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonuçları yorumlanarak atomik sensörün çınlama odalarının yüksek seviyeli mikrodalga alan şiddetlerini doğrulamada kullanılabilmesi tartışılmıştır.

## 2. Teori

Cs atomlarının D<sub>2</sub> enerji geçişi 852 nm dalga boyundaki lazer ışınlarına karşılık gelmektedir. İçerisinde Cs atomları bulunan kuvarz camdan yapılmış silindirik bir tüp içerisinden geçirilen lazer demeti Cs atomlarını 6S<sub>1/2</sub> (F=4) ↔ 6P<sub>3/2</sub> (F=5, 4, 3) geçişlerini yapacak şekilde taramaktadır. Bu geçişlere Doppler altı rezonanslar denilmektedir ve lazerin frekansı çalışma kapsamında 6S<sub>1/2</sub> (F=4) ↔ 6P<sub>3/2</sub> (F=4) geçişine kilitlenecektir.

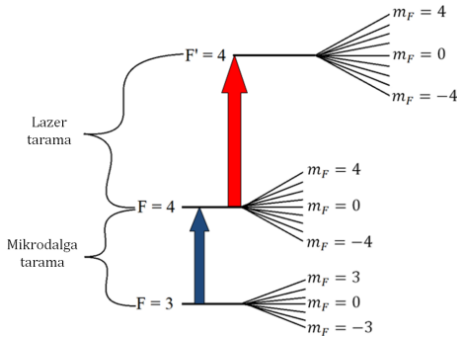
Lazerin frekansı 6S<sub>1/2</sub> (F=4) ↔ 6P<sub>3/2</sub> (F=4) enerji geçişine kilitlendiğinde, cam küvet içindeki atomlar, 6S<sub>1/2</sub> (F=4) seviyesinden 6P<sub>3/2</sub> (F=4) olan üst seviyeye çıkmaktadırlar. Daha sonra bu atomlar bir kısmı kendiliğinden geri 6S<sub>1/2</sub> (F=4) seviyesine, diğer kısmı ise kullanılmayan 6S<sub>1/2</sub> (F=3) seviyesine geçiş yapmaktadırlar.

Lazer frekansı 6S<sub>1/2</sub> (F=4) ↔ 6P<sub>3/2</sub> (F=4) enerji geçişine kilitli iken 6S<sub>1/2</sub> (F=3) ↔ 6S<sub>1/2</sub> (F=4) seviyeleri arasındaki enerji farkı elektromanyetik spektrumun mikrodalga frekans bölgesine denk gelmektedir. Mikrodalga alanın frekansı 6S<sub>1/2</sub> (F=3) ve 6S<sub>1/2</sub> (F=4) geçişine tam olarak denk gelen 9,192631770 Hz frekansına eşit olduğunda, 6S<sub>1/2</sub> (F=3) alt seviyesinde bulunan atomlar mikrodalga ışınmasını soğurarak bir üst seviye olan 6S<sub>1/2</sub> (F=4) seviyesine geçiş yapmaktadırlar. Bu geçiş sonucunda 6S<sub>1/2</sub> (F=4) seviyesindeki atomların sayısı, dolayısıyla 6S<sub>1/2</sub> (F=4) ↔ 6P<sub>3/2</sub> (F=4) geçişine kilitlenmiş lazerin soğurumu da artmaktadır. Böylece sezyum küvetinden geçen lazerin soğurum rezonansı olan Doppler soğurumu bir miktar artış göstermektedir. Bu artış ise DROR rezonansı olarak bilinen çift radyo optik rezonans olarak adlandırılmaktadır [17]. DROR rezonansının 6S<sub>1/2</sub> (F=4) ↔ 6P<sub>3/2</sub> (F=4) geçişindeki Doppler soğurum rezonansının maksimum olduğu noktanın karşılığı olan zamanla değişmeyen sabit sinyal üzerinde gösterimi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. DROR rezonansının DC seviye üzerinde gösterimi (a)  $6S_{1/2}(F=4) \leftrightarrow 6P_{3/2}(F=4)$  geçişinde meydana gelen soğurum sinyalinin tepe noktasına ayarlanmış DC seviye (maksimum soğurum değeri) (b) mikrodalga açılması ile soğurumdaki artış-DROR sinyali

Mikrodalga alan altında DROR işaretine ek olarak normalde var olmayıp Cs atomlarına dış bir DC manyetik alan uygulandığında ortaya çıkan Zeeman enerji yarılımları meydana gelmektedir. Cs atomlarının lazer ve mikrodalga ile etkileşime girdiği enerji seviyeleri ile Zeeman yarılımlarının gösterimi Şekil 2.'de verilmiştir [18].

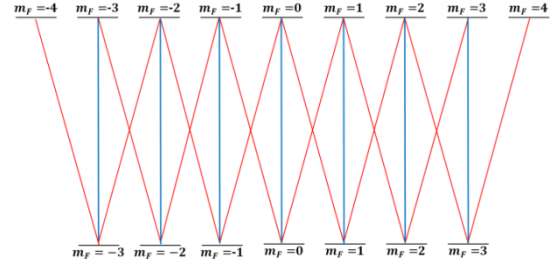


Şekil 2. Cs atomlarının  $D_2$  enerji geçişinde Zeeman enerji yarılımları gösterimi

Şekil 2'de  $6S_{1/2}(F=3)$  ve  $6S_{1/2}(F=4)$  seviyeleri  $2F+1$  adet alt enerji seviyesine ayrılmaktadır. Bu durumda  $F=4$  ve  $F'=4$  geçişlerinde  $2F+1=2*4+1=9$  adet yani  $m_F=+4...-4$  kadar,  $F=3$  geçişinde ise  $2F+1=2*3+1=7$  adet yani  $m_F=+3...-3$  Zeeman yarılması meydana gelmektedir. Meydana gelen Zeeman yarılımları arasında oluşan geçişlerin türleri aşağıda denklem (1) ile verilen kurala göre belirlenmektedir.

$$\Delta m_F = m'_F - m_F \quad (1)$$

Burada  $\Delta m_F$  değeri kuantum mekaniğine göre  $\Delta m_F=0, \pm 1$  değerlerini alabilmektedir. Yani valans elektron yalnızca aralarında  $0, \pm 1$  farkları oluşabilen geçişleri yapabilmektedir.  $\Delta m_F=0$  ise yapılan geçiş  $\pi$ -geçışı,  $\Delta m_F=\pm 1$  ise yapılan geçiş  $\sigma$ -geçışı olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3. Zeeman geçiş türlerinin renkli gösterimi, mavi çizgiler  $\Delta m_F=0$  olan  $\pi$ -geçişlerini, kırmızı çizgiler ise  $\Delta m_F=\pm 1$  olan  $\sigma$ -geçişlerini temsil etmektedir.

Burada 14 adet  $\sigma$ -geçişinden 12 tanesi çiftler halinde bulunmaktadır. Çift  $\sigma$  geçişleri arasındaki frekans farkı sistemimiz tarafından algılanamayacak kadar küçük olduğundan toplamda  $14 - 12/2 = 8$  adet  $\sigma$ -geçışı görülmektedir. Şekil 3'te verildiği üzere 8 adet  $\sigma$ -geçışı ve 7 adet de  $\pi$ -geçışı olmak üzere toplamda 15 adet geçiş görülmektedir.  $6S_{1/2}(F=3) \leftrightarrow 6S_{1/2}(F=4)$  geçişinde meydana gelen tüm Zeeman enerji yarılımları indekslenerek, geçiş türleri ve geçiş adları  $L_{m_F, m'_F}$  gösterimi ile Tablo 1'de verilmektedir.

Tablo 1.  $6S_{1/2}(F=3)$  ve  $6S_{1/2}(F=4)$  seviyelerinde meydana gelen tüm Zeeman enerji yarılımları indeksi ve geçiş tipleri

İndeks	Geçiş adı	Geçiş tipi
1	$L_{-4,-3}$	$\sigma^-$
2	$L_{-3,-3}$	$\pi$
3	$L_{-3,-2}, L_{-2,-3}$	$\sigma^\pm$
4	$L_{-2,-2}$	$\pi$
5	$L_{-2,-1}, L_{-1,-2}$	$\sigma^\pm$
6	$L_{-1,-1}$	$\pi$
7	$L_{0,-1}, L_{-1,0}$	$\sigma^\pm$
8	$L_{0,0}$	$\pi$
9	$L_{1,0}, L_{0,1}$	$\sigma^\pm$
10	$L_{1,1}$	$\pi$
11	$L_{2,1}, L_{1,2}$	$\sigma^\pm$
12	$L_{2,2}$	$\pi$
13	$L_{3,2}, L_{2,3}$	$\sigma^\pm$
14	$L_{3,3}$	$\pi$
15	$L_{4,3}$	$\sigma^+$

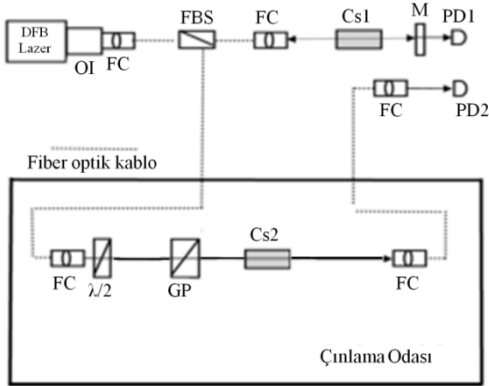
### 3. Deneysel Düzenek ve Ölçüm Yöntemi

Ölçüm düzenekleri temelde bir optik ve bir mikrodalga kısım olmak üzere iki ana düzenekten oluşmaktadır. Optik ölçüm düzenekleri de kendi içinde ikiye ayrılmaktadır, bunlardan optik ölçüm düzeneklerinin ilk kısmı çınlama odası dışında bulunan optik masa üzerinde kurulu düzenektir. Bu kısım Şekil 4 ile verilen referans Cs1 küvetinde oluşan Doppler altı rezonansları görüntülemek amacıyla kullanılmaktadır. Çalışmanın temelini oluşturan ölçüm düzeneklerinin blok şeması Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4. Cs1 küvetinde Doppler soğurumu spektrumu üzerinde Doppler soğurum içi rezonansların osiloskop ekranındaki görünümü

Optik masa üzerinde 852 nm dalga boyunda lazer ışını üretmek için bir DFB (Distributed Feedback Laser) lazer kaynağı kullanılmıştır. DFB lazer kaynağının sıcaklığı (25 GHz/K) ve akımı (1GHz/mA) uygun olarak değiştirilerek lazer frekansı sezyum atomlarının  $6S_{1/2}$  ( $F=4$ ) ve  $6P_{3/2}$  ( $F=3, 4$  ve  $5$ ) geçişini yapacak şekilde ayarlanmış ve Şekil 5'te yer alan düzenekte Toptica marka DL100 model DFB lazerin çıkış demeti FC ışın toplayıcıya yönlendirilmiştir. Lazer ışığı fiber kablodan geçerek bir fiber ışın ayırıcı FBS ile 10/90 oranında ikiye ayrılmış ve lazer ışığının %10'luk kısmı referans Cs1 küvetine, diğer %90'lık kısmı ise çınlama odası içerisindeki Cs2 küvetine gönderilmiştir. Fiber optik ile sonlandırılmış bir FC ışın toplayıcısı kullanarak %10'luk lazer ışını Cs1 küveti üzerinden geçirilerek Doppler içi rezonansları gözlemlemek için M aynasından geçirilerek bir kısmı geri yansıtılmıştır. Geri dönen ışık ile iletilen ışık birbiri ile tam olarak kesişecek şekilde hassas ayarlanmıştır. İletilen lazer ışını ilk foto diyot olan PD1 ile algılanır. Burada Cs1 referans küveti zamanla değişmeyen sabit bir lazer frekansının üretilmesi için gerçekleştirilecek olan kilitleme işleminde kullanılmıştır. Burada ölçümlerde kullanılan Cs1 küvetinin boyutları 7 cm (boy) x 2 cm (en)'dir. Cs1 küveti referans küvet olup oda dışındaki optik masada konumlandırılırken, Cs2 küveti ise ölçümlerin yapılacağı sensör olup çınlama odası içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 5. Optik deney düzeneğinin (a) çınlama odası dışında ve optik masa üzerinde bulunan kısmı (b) çınlama odası içinde bulunan kısmı

Optik ölçüm düzeneğinin ikinci kısmı homojen ve yüksek seviyeli mikrodalga alan üretmek amacıyla çınlama odası içinde kurulmuştur. Şekil 4'te çınlama odası içinde bulunan optik deney düzeneği bir adet 2 (cm) x 2 (cm) boyutlarında

silindirik Cs2 test tüpü,  $\lambda/2$  polarizatörü, bir adet  $\lambda/2$  dalga düzlemi ve FC ile verilen verilen fiber kuplajlayıcı ışın toplayıcılardan oluşmaktadır.

Daha önce optik deney düzeneğinin birinci kısmında ışın bölücü FBS ile 10/90 oranında ikiye bölünen lazer ışığının kalan %90'luk kısmı FC çıkışlı 50 m'lik bir fiber kablo ile çınlama odası içerisine gönderilmiştir. Bu lazer ışını bir dalga düzlemi  $\lambda/2$ 'den geçirilerek, GP ışın polarizatörüne oradan da Cs2 küvetinden geçirilerek yine 50 m'lik ucunda FC çıkışı bulunan fiber optik kablo ile çınlama odası dışında bulunan optik masa üzerindeki ikinci foto diyot olan PD2'ye getirilmiştir.

Ölçümlerde kullanılan fiber kablolar tek modlu (single mode) ve polarizasyona duyarlı kablolardır. Işın polarizatörü ise lineer polarizeli lazer ışığı üretmek için kullanılmıştır. Cs küvetlerinden geçen lazer ışığının çapı yaklaşık 5 mm olarak ayarlanmıştır.

Şekil 5'te verilen düzenekte Doppler içi rezonansları görüntülenmesi ve kilitleme işleminin gerçekleştirilmesi için Cs1 referans tüpünün çıkışında bulunan PD1 foto diyotu ve çift radyo optik rezonansın gözleneceği PD2 foto diyotunun çıkışları farklı osiloskoplar ile gözlenmiştir.

Çift radyo optik rezonansın gözlenebilmesi için Cs2 tüpü üzerine gönderilen mikrodalga alanın frekansının (9,192631770 Hz) belirli bir bant genişliğinde taranarak gönderilmesi gerekmektedir. Mikrodalga alanın frekansının tarama işlemi FM (Frequency Modulation) sinyal gönderilerek yapılmaktadır. Uygulanan mikrodalga işaret taraması DROR işareti üzerinde yaklaşık 20,85 MHz'lik bant genişliğine karşılık gelecek şekilde ayarlanmıştır.

$6S_{1/2}$  ( $F=4$ ) ve  $6P_{3/2}$  ( $F=3, 4$  ve  $5$ ) geçişlerini tarayan DFB lazerin frekansı zamanla lazerin akım ve sıcaklık değişimlerinden dolayı kayacağından, lazerin frekansı  $6S_{1/2}$  ( $F=4$ ) ve  $6P_{3/2}$  ( $F=4$ ) geçişinde bir kilitleme cihazı kullanılarak sabitlenmiştir [19].

Düzeneğin mikrodalga üretim kısmı bir mikrodalga işaret üretici, 500 W çıkış gücüne sahip mikrodalga güç yükseltici, standart kazançlı horn anten içermektedir. Horn anten girişindeki gücü ölçmek ve sezyum çalışma küveti üzerinde kontrollü bir elektrik alanı oluşturmak için güç yükselticinin RF örnekleme (RF sample) portundan ileri yönde iletilen güç değerleri ölçülmüştür.

Çınlama odasında bulunan Cs2 test tüpünün konumunda mikrodalga alan şiddeti HI-6053 model elektrik alan probu yardımıyla ölçülmüştür. Elektrik alan probunun ölçtüğü elektrik alan değeri referans alınarak çınlama odasının karıştırıcısı (tuner)  $0.5^\circ$  adımlarla döndürülmüştür. Maksimum elektrik alanının ölçüldüğü karıştırıcı pozisyonu  $259,7^\circ$  olarak kaydedilmiştir. Bu karıştırıcı pozisyonu ölçümler boyunca sabit tutularak ve oda içerisinde herhangi bir değişiklik yapmadan atomik sensörün çift radyo optik rezonansının değişimleri, elektrik alan probunun ölçtüğü değerler ile eş zamanlı olarak kaydedilmiştir.

Çınlama odası içindeki ölçümlerde teorik mikrodalga alanı hesaplanmamış, bunun yerine ölçümler sırasında elektrik alan seviyesi probun zarar göreceği seviyenin altında olduğundan elektrik alan probu oda içerisinde bırakılmıştır. Böylece Cs2 tüpü üzerinde oluşan elektrik alan değeri kalibreli bir elektrik alan probu ile gerçek zamanlı olarak atomik sensör ile aynı anda eş zamanlı ölçme imkanı vermiştir. Elektrik alan probunun okuduğu değeri ekranda görmek için PC ile haberleşme programı olarak ETS-LINDGREN firmasına ait Probe ViewLT yazılımı kullanılmıştır.

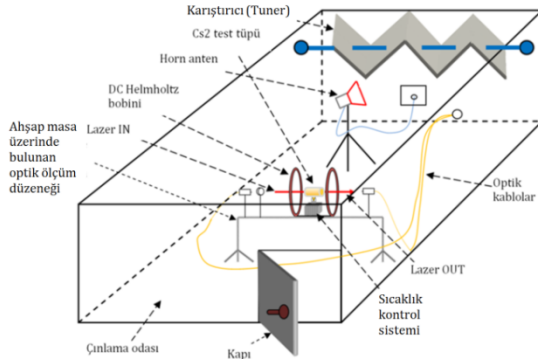


Ölçüm düzeneğinin Zeeman yarılmalarının üretildiği ve DC manyetik alanın oluşturulduğu kısımda DC güç kaynağı, Helmholtz bobinleri ve  $0,5 \Omega$  değerinde bir direnç kullanılmıştır. Multimetre yardımıyla  $0,5 \Omega$  direnç üzerinden okunan gerilimler Zeeman komponentlerinin üretilmesi için gerekli olan manyetik alan değerinde kaydedilmiştir. DC manyetik alan üretimi için kullanılan Helmholtz halkasının çapı ve bobinler arasındaki mesafe  $18 \text{ cm}$ 'dir.

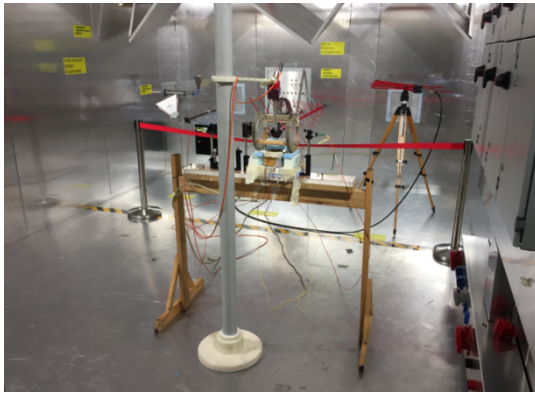
Çınlama odası içinde ölçümler sırasında lazerin polarizasyonu lineer olarak tutulmuştur. Bu metot kullanılarak, yüksek seviyeli elektromanyetik dalgaların ölçümleri sürekli dalga (Continuous wave) modunda yapılmıştır.

Optik ölçüm düzeneğinin çınlama odası içerisinde ahşap masa üzerinde konumlandırılan bölümü ile horn antenin çınlama odası içerisindeki yerleşimi Şekil 6'da verilmiştir. Çınlama odası içinde bulunan ölçüm düzeneğinin örnek görünümü ise Şekil 7'de verilmiştir.

Verilen düzenekte, DC Helmholtz halkası ile çevrelenmiş sezyum tüpü, horn anten ve lazer giriş/çıkışına imkan veren fiber kafaları çınlama odası içerisinde konumlandırılırken, lazer ve mikrodalga kaynakları ve diğer ilgili tüm elektronik cihazlar oda dışarısında konumlandırılmıştır.



Şekil 6. Çınlama odası ve içindeki ölçüm düzeneği temsili gösterimi



Şekil 7. Çınlama odası içerisindeki ölçüm düzeneğinin görünümü

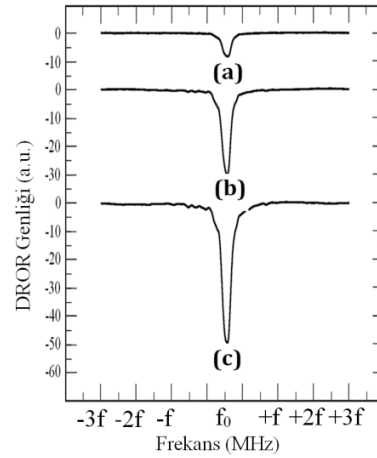
## 4. Sonuçlar

Çınlama odası içinde oluşturulabilecek mikrodalga alanı tamamen oda boyutları ve mikrodalga güç yükselticinin maksimum çıkış gücü ile sınırlıdır. Bu nedenle bu oda boyutları  $(4,9 \text{ m}) \times (3,6 \text{ m}) \times (3 \text{ m})$  ve laboratuarda mevcut bulunan  $500 \text{ W}$  güç yükseltici ile maksimum  $500 \text{ V/m}$  seviyelerine ulaşılmıştır. Bu seviyeler oda boyutları küçültülerek veya daha yüksek güçlü özel darbe (pulse) kuvvetlendiriciler yardımıyla artırılabilir. Yine de çınlama odası içinde oluşan mikrodalga alan değeri homojen bir elektrik alan ortamı olması bakımından daha gerçek ve etkili bir elektrik alan değeridir.

Çınlama odası içindeki ölçümler  $100 \text{ V/m}$ ,  $200 \text{ V/m}$ ,  $300 \text{ V/m}$ ,  $400 \text{ V/m}$  ve  $500 \text{ V/m}$  seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Mikrodalga alan seviyesinin düşük olması nedeniyle maksimum etkileşim için ölçümler maksimum lazer gücü olan  $12,2 \text{ mW}$  değerinde alınmıştır. Osiloskop üzerinde ölçümler alınırken bant genişliği ölçümleri genliğin yarıya düştüğü yerde osiloskopun “- width” dedektörü kullanılarak, genlik ölçümleri ise osiloskopun “V amplitude” dedektörü kullanılarak alınmıştır.

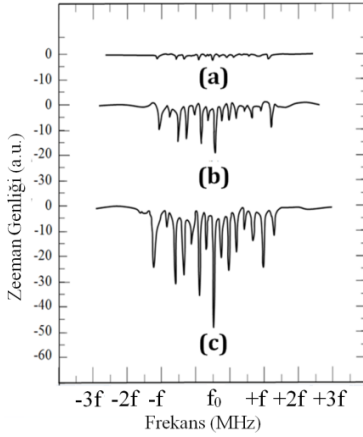
Ölçümlerde lazer polarizasyonu ve DC manyetik alan birbirine paralel olarak ayarlanmıştır.

Sabit  $12,2 \text{ mW}$  lazer gücünde farklı mikrodalga alan seviyelerine karşılık osiloskop ekranında gözlenen çift radyo optik rezonansın görselleri Şekil 8'de verilmiştir.



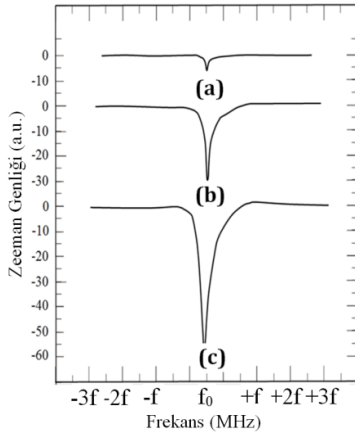
Şekil 8.  $12,2 \text{ mW}$  sabit lazer gücünde farklı mikrodalga alan seviyelerinde  $6S_{1/2} (F=3) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4)$  geçişinin DROR sinyalinin genlik değişimi gösterimleri (yatay eksen  $f_0 \approx 9,192 \text{ GHz}$  ve  $\approx 10 \text{ MHz}$ ), elektrik alan seviyeleri a)  $100 \text{ V/m}$ , b)  $300 \text{ V/m}$  ve c)  $500 \text{ V/m}$

Bu ölçümlerde osiloskop ekranında çift radyo optik rezonans gözlemlendikten sonra DC manyetik alan altında Zeeman yarılmaları üretilmiştir. Sabit  $12,2 \text{ mW}$  lazer gücünde farklı mikrodalga alan seviyelerinde gözlenen 15 adet Zeeman ayrışmasının görselleri Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. 12,2 mW sabit lazer gücünde farklı mikrodalga alan seviyelerinde gözlenen 15 adet Zeeman spektrumunun gösterimi (yatay eksende  $f_0 \approx 9,192$  GHz ve  $f \approx 10$  MHz) (a) 100 V/m, (c) 300 V/m, (d) 500 V/m

Osiloskop ekranında Zeeman spektrumu gözlemlendikten sonra yalnızca  $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$   $\pi$ -geçişini olan merkez Zeeman rezonansı kalana kadar DC manyetik alan değeri yaklaşık 1100  $\mu$ T şiddetine kadar artırılmıştır.  $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$   $\pi$ -geçişini olan merkez Zeeman rezonansının sabit 12,2 mW lazer gücünde, farklı mikrodalga alan seviyelerine karşılık osiloskop ekranında gözlenen genlik değişimleri Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. 12,2 mW sabit lazer gücünde ve farklı mikrodalga alan seviyelerinde  $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$   $\pi$ -geçişini için merkez Zeeman rezonansının gösterimi (yatay eksende  $f_0 \approx 9,192$  GHz ve  $f \approx 2$  MHz), (a) 100 V/m, (b) 300 V/m, (c) 500 V/m

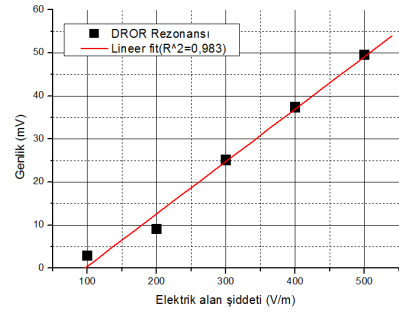
Çalışmada  $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$   $\pi$ -geçişinde Zeeman rezonansının genlik ve bant genişliği ölçümlerine ek olarak DROR rezonansı genliği de ölçülmüştür. Ölçümler 12,2 mW sabit lazer gücünde, 100 V/m-500 V/m mikrodalga alan seviyeleri arasında 100 V/m adımlarla gerçekleştirilmiştir. Atomik sensörün DROR rezonansının genlik cevabı Şekil 11'de,

$6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$   $\pi$ -geçişinde Zeeman rezonansının bant genişliği ve genlik sonuçları ise sırasıyla Şekil 12 ve Şekil 13'te verilmiştir.

Mikrodalga alan şiddetinin artışıyla Zeeman merkez rezonansının bant genişliğindeki (çizgi kalınlığı) artışın düşük lazer güçlerinde aşağıda denklem (2) ile verilen kurala uyması beklenmektedir [17].

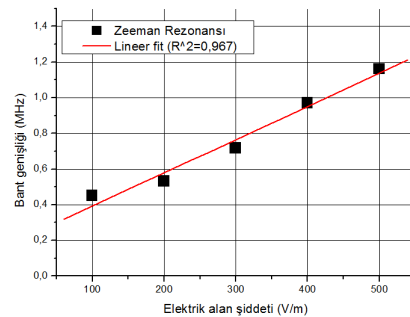
$$\Delta\omega \sim a/2 + a/2\sqrt{1 + \frac{E^2}{b}} \quad (2)$$

Burada a merkez Zeeman sinyalinin minimum lazer gücünde ve minimum mikrodalga alan altındaki çizgi kalınlığıdır. E ise mikrodalga alanın elektrik alan bileşenidir. b değişkeni ise atomun geçiş olasılıklarına ve lazerin çapı gibi lazer ışınının diğer geometrik parametrelerine bağlı bir sabittir. Bu formüle göre de rezonansın bant genişliği ile mikrodalga alan arasındaki ilişki belirli bölgede lineer olma özelliğine sahiptir.



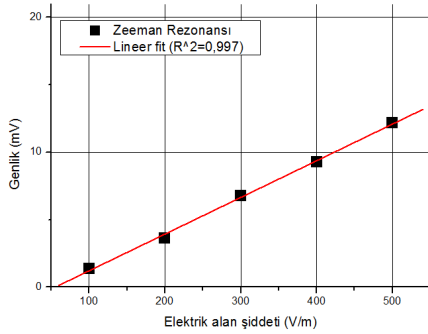
Şekil 11. 12,2 mW sabit lazer gücünde  $6S_{1/2} (F=3) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4)$  enerji geçişinde DROR rezonansının genliğinin mikrodalga alan şiddetine bağlılığı

Şekil 11'deki grafikte DROR rezonansı genlik değişimi ile uygulanan mikrodalga alanın şiddeti arasındaki ilişki lineer eğri uyulmama yapıldığında  $R^2$  değeri 0,983 bulunmuştur. Mikrodalga alan şiddeti 100 V/m değerinden 500 V/m değerine arttırıldığında DROR rezonansının genliği mikrodalga etkisi sonucunda 2,80 mV değerinden 48,50 mV değerine kadar lineer olarak genişlemiştir.



Şekil 12. 12,2 mW sabit lazer gücünde  $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$   $\pi$ -geçişini için Zeeman rezonansının bant genişliğinin mikrodalga alan şiddetine bağlılığı

Şekil 12’de mikrodalga alan şiddeti 100 V/m değerinden 500 V/m değerine arttırıldığında DROR rezonansının  $6S_{1/2}$  ( $F=3, m_F=0$ )  $\leftrightarrow$   $6S_{1/2}$  ( $F=4, m_F=0$ )  $\pi$ -geçişinde Zeeman sinyalinin bant genişliği mikrodalga etkisi sonucunda 0,45 MHz değerinden 1,16 MHz değerine kadar lineer olarak genişlemiştir.



Şekil 13. 12,2 mW sabit lazer gücünde  $6S_{1/2}$  ( $F=3, m_F=0$ )  $\leftrightarrow$   $6S_{1/2}$  ( $F=4, m_F=0$ )  $\pi$ -geçiş için Zeeman rezonansının genliğinin mikrodalga alan şiddetine bağlılığı

Şekil 13’te mikrodalga alan şiddeti 100 V/m değerinden 500 V/m değerine arttırıldığında DROR rezonansının  $6S_{1/2}$  ( $F=3, m_F=0$ )  $\leftrightarrow$   $6S_{1/2}$  ( $F=4, m_F=0$ )  $\pi$ -geçişine karşılık gelen Zeeman sinyalinin genliği mikrodalga etkisi sonucunda 1,39 mV değerinden 12,17 mV değerine kadar lineer olarak genişlemiştir.

Şekil 11 ve Şekil 12 birlikte yorumlandığında artan mikrodalga alan şiddetine karşılık  $6S_{1/2}$  ( $F=3, m_F=0$ )  $\leftrightarrow$   $6S_{1/2}$  ( $F=4, m_F=0$ )  $\pi$ -geçişinde merkez Zeeman rezonansında genliğin artmasıyla birlikte bant genişliği de lineer olarak artmaktadır.  $6S_{1/2}$  ( $F=3, m_F=0$ )  $\leftrightarrow$   $6S_{1/2}$  ( $F=4, m_F=0$ )  $\pi$ -geçişinde merkez Zeeman rezonansının Şekil 12 ile verilen mikrodalga alan şiddetine bağlılığı lineer eğri uyulmama yapıldığında  $R^2$  değeri 0,967 bulunurken, Şekil 13 ile verilen Zeeman rezonansının genliğinin mikrodalga alana bağlılığı lineer eğri uydurma yapıldığında  $R^2$  değeri 0,997 olarak bulunmaktadır. Lineer eğri uydurma için bulunan  $R^2$  değerleri çalışma kapsamında ölçümleri gerçekleştirilen Zeeman bant genişliği ve genlik değişimlerinin 100 V/m-500 V/m mikrodalga alan seviyeleri arasında lineer bir uyum içinde olduğunu göstermektedir. Ancak burada makalenin giriş kısmında da değinildiği gibi rezonansın genlik ve bant genişliği ölçümlerinde optik arka plan gürültüsü, sinyal/gürültü oranı ve foto diyotun doyum etkileri gibi bazı bozucu etkenler bulunmaktadır. Bahsedilen olumsuz etkiler rezonansın genlik ölçümlerine direkt etki edebilirken, rezonansın bant genişliği ölçümlerinin yatay eksen ve frekansa bağlı gerçekleştirilmesi nedeniyle daha az hissedilecektir.

DROR işaretinin Zeeman rezonansının bant genişliği ölçümleri ( $k=2$  kapsam faktörü ve %95 güven aralığında) 3,5 dB ölçüm belirsizliği içinde gerçekleştirilmiştir. Burada 2,5 dB değeri oluşturulan mikrodalga alanın belirsizliği, geriye kalan 1 dB ise bant genişliğinin ölçülmesinde lazer gücündeki değişimler, optik arka plan gürültüsü, sinyal/gürültü oranı, foto diyotun doyum etkileri ile foto diyotun doğrusallığı ve osiloskobun frekans ölçme hassasiyeti gibi belirsizlik bileşenlerinden gelmektedir.

DROR rezonansının genlik ölçümleri ile DROR rezonansının merkez Zeeman rezonansının genlik ölçümleri ise 4,5 dB ( $k=2$  kapsam faktörü ve %95 güven aralığında) ölçüm belirsizliği içinde gerçekleştirilmiştir. Burada yine oluşturulan mikrodalga alanın belirsizliği 2,5 dB iken optik arka plan gürültüsü, sinyal/gürültü oranı, osiloskopun genlik ölçme hassasiyeti, lazer gücündeki değişimler ve foto diyotun doyum etkileri ile foto diyotun doğrusallığı gibi ölçüm parametreleri rezonansın genlik ölçümleri üzerinde daha fazla etkili olduğundan bu kısımdan gelen belirsizlik değeri ise 2 dB’dir.

## 5. Tartışma

Bu çalışmada literatürde ilk defa çınlama odası içinde oluşturulan homojen ve yüksek seviyeli elektromanyetik alan ortamında Cs atomunun enerji geçişlerinden elde edilen DROR rezonansları ve Zeeman rezonansları görüntülenmiş ve bu rezonanslardan DROR rezonansının genlik ölçümleri,  $6S_{1/2}$  ( $F=3, m_F=0$ )  $\leftrightarrow$   $6S_{1/2}$  ( $F=4, m_F=0$ )  $\pi$ -geçişinin merkez Zeeman rezonansının ise bant genişliği ile genlik ölçümleri çalışma kapsamında mümkün olan maksimum mikrodalga alan seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Atomik geçişlerden elde edilen bu rezonanslar ile çınlama odası içinde üretilen mikrodalga alan şiddeti arasındaki ilişki araştırılmıştır.

Atomik sensörler küçük boyutları, dielektrik yapısı ve geniş dinamik aralıkları ile üstün özelliklere sahiptir. Özellikle frekans seçici olmaları ile yüksek mikrodalga alan seviyelerinde daha fazla hissedilen harmonik problemlerinin de etkisini azaltıcı bir avantaj da sunmaktadır.

Sonuç olarak bu çalışma ile atomik sensör sisteminin DROR rezonansının Zeeman bant genişliği ile genlik ölçümleri uygun şekilde kullanıldığında, bu atomik sensörün çınlama odalarının kalibrasyon ölçümlerinin yanı sıra yüksek seviyelerde gerçekleştirilen test ölçümleri esnasında da oda içinde bulunabileceği, oda içinde oluşturulan elektromanyetik alanın değerinin deneysel ve gerçek zamanlı olarak ölçülmesine olanak sağlayan yeni bir ölçüm sisteminin temellerinin atıldığı söylenebilir.

## Kaynaklar

- [1] IEC 61000-4-21, Testing and measurement techniques-Reverberation chamber test methods, 2nd ed., International Electrotechnical Commission, 2011.
- [2] RTCA DO-160F, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment.
- [3] RTCA DO-160G, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment.
- [4] “Requirements for the Control of Electromagnetic Interference Characteristics of Subsystems And Equipment”, Department of Defence USA, MIL-STD-461F-2007.
- [5] Çakır S., Aslan Ç. and Leferink F.” Comparison of Test Standards for Immunity Testing in Reverberation Chambers”, Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), Seoul, Korea, 2017.
- [6] Holloway C. L., Gordon J. A., Simons M. T., Fan H., Kumar S., Shaffer J. P., Anderson D. A., Schwarzkopf A., Miller S. A., Thacharoen N., Raithe G., “Atom-based RF electric field measurements: An initial investigation of the measurement uncertainties”,

- Electromagnetic Compatibility IEEE International Symposium, 467-472, 2015.
- [7] Fan H., Kumar S., Sedlacek J., Kübler H., Karimkashi S., Shaffer J. P., "Atom based RF electric field sensing", *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 48, 202001, 2015.
- [8] Holloway C. L., Gordon J.A., Jefferts S., Schwarzkopf A., Anderson D. A., Miller S. A., Thaicharoen N., Raithel G., "Broadband Rydberg Atom-Based Electric-Field Probe for SI-Traceable Self-Calibrated Measurements", *Antennas and Propagation IEEE Transactions*, 62, 12, 6169-6182, 2014.
- [9] Song Z., Feng Z., Liu X., Li D., Zhang H., Liu J., Zhang L., "Quantum-Based Determination of Antenna Finite Range Gain by Using Rydberg Atoms", *Antennas and Wireless Propagation Letters IEEE*, 16, 1589-1592, 2017.
- [10] Song Z., Zhang W., Liu X., Zou H., Zhang J., Jiang Z., Qu J., "Quantum-Based Amplitude Modulation Radio Receiver Using Rydberg Atoms", *Globecom Workshops IEEE*, 1-6, 2018.
- [11] Web 1, <https://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/>, 2017.
- [12] Web2, <https://www.bipm.org/cc/CCEM/Allowed/30/CC-EM-17-Report-NIST.pdf>, 2017.
- [13] Çetintaş M., Hamid R., Şen O., Çakır S., "Traceable field strength measurements based on laser spectroscopy techniques", TP-2 20th Int. Zurich Symp. Electromagn. Compat., Zurich, Switzerland, 2009.
- [14] Çetintaş M., Hamid R., Şen O., Çakır S., "Characterization of a far-field microwave magnetic field strength sensor based on double radio-optical resonance," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 52, 1, 21-31, 2010.
- [15] Çetintaş M., Çakır S., Hamid R., Şen O., "Toward absolute measurements of far-field microwave magnetic field by atomic sensor based on double radiooptical resonance", *IEEE Trans. on Electromagnetic Compat.*, 54, 1, 225-227, 2012.
- [16] Çakır S., Hamid R., Çetintaş M., Çakır G., Şen O., "Sensing of RF Magnetic Fields Using Zeeman Splitting of Double Radiooptical Resonance and a New Approach to Helmholtz Coil Calibrations", *Sensors Journal IEEE*, 12, 7, 2465-2473, 2012.
- [17] Demtröder W., "Laser Spectroscopy", 2nd ed., Springer-Verlag, New York, 1996.
- [18] Steck D. A., "Cesium D Line Data", revision 2.1.4, 2010.
- [19] Gamidov R.G., Taşkın İ., Çetintaş M., Sautenkov V., "Unmodulated External-Cavity Diode Laser Stabilized on Cesium D2 Line", *IEE Proc. Science, Measurement and Technology*, 143, 4, 263-264, 1996.





**Dr. Mustafa Çetintaş**

Mustafa Çetintaş, 1992 yılında ODTÜ Fizik Bölümünden mezun olmuştur. Kocaeli Üniversitesi Fizik bölümünden 1998 yılında yüksek lisans derecesini, doktora derecesini ise Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsünden 2003 yılında almıştır. 1993 yılından itibaren TÜBİTAK UME (Ulusal Metroloji Enstitüsü)'de çalışmaktadır. Güncel araştırma konuları arasında mikrodalga atomik frekans standartları, lazer spektroskopi çalışmaları, lazerlerin frekans stabilizasyonunun artırılması ve metrolojik uygulamaları ve elektromanyetik metroloji yer almaktadır.



**Çağlar Aslan**

Çağlar Aslan, 2012 yılında Erciyes Üniversitesi Fizik Bölümünden mezun olmuştur. Yüksek lisansını ise Gebze Teknik Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı, Metroloji Programında 2019 yılında tamamlamıştır. 2014 yılından beri TÜBİTAK UME (ULUSAL METROLOJİ ENSTİTÜSÜ) Elektromanyetik Laboratuvarında EMC/EMI Test ve kalibrasyon ölçümleri, elektromanyetik kirlilik ölçümleri, çınlama odaları (reverberation chambers), lazer-atom-mikrodalga etkileşimi ve elektromanyetik metroloji konuları üzerine çalışmaktadır.