

Atomik Sensörlerde Güç Genişleme Etkisi ile Yüksek Seviyeli Mikrodalga Alan Şiddeti Ölçümü High Level Microwave Field Strength Measurement at the Atomic Sensors with Power Broadening Effect

Mustafa Çetintas¹, Çağlar Aslan¹

¹TÜBİTAK Ulusal Metroloji Enstitüsü, Kocaeli, Türkiye
mustafa.cetintas@tubitak.gov.tr, caglar.aslan@tubitak.gov.tr

Öz

Bu çalışmada yüksek seviyeli mikrodalga alanların algılanması amacıyla lazer-atom-mikrodalga etkileşimine dayanan bir Cs atomik sensör sistemi önerilmiştir. Çalışma kapsamında lazer ışınının frekansı, Cs atomik sensörünün D_2 enerji geçişinde bulunan $6S_{1/2}$ ($F=4$) \leftrightarrow $6P_{3/2}$ ($F=4$) enerji geçişine kilitlenmiştir. $6S_{1/2}$ ($F=3$) \leftrightarrow $6S_{1/2}$ ($F=4$) enerji geçişine denk gelen 9,192 GHz frekansında yüksek seviyeli mikrodalga alan uygulanarak DROR (çift radyo optik rezonans) elde edilmiştir. Bu rezonansın DC manyetik alan altında Zeeman alt seviyeleri gözlenmiş ve bunlardan $6S_{1/2}$ ($F=3$, $m_F=0$) \leftrightarrow $6S_{1/2}$ ($F=4$, $m_F=0$) π -geçişine odaklanılmıştır. Atomik sensörün farklı lazer güçlerinde ve 500 V/m ile 7.5 kV/m arasında değişen yüksek seviyeli mikrodalga alan şiddetlerinde ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Uygulanan yüksek seviyeli mikrodalga alan şiddetlerinde, $6S_{1/2}$ ($F=3$, $m_F=0$) \leftrightarrow $6S_{1/2}$ ($F=4$, $m_F=0$) π -geçişinin bant genişliği ve genlik ölçümlerinin değişimi araştırılmıştır. Bunun sonucunda yüksek seviyeli mikrodalga alanların algılanmasında kullanılacak olan DROR rezonansının Zeeman geçişi için bant genişliği ölçümlerinin genlik ölçümlerine göre üstünlükleri tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Elektromanyetik alanlar,
Lazer-atom-mikrodalga etkileşimi.

Abstract

In this study, a Cs atomic sensor system is proposed to detect high-level microwave field based on laser-atom-microwave interaction. Within the scope of the study, the frequency of the laser is locked to the $6S_{1/2}$ ($F=4$) \leftrightarrow $6P_{3/2}$ ($F=4$) energy transition on the D_2 line of Cs atomic transition. The DROR (double radio optical resonance) resonance was obtained by applying a high level microwave field at the frequency of 9,192 GHz corresponding to $6S_{1/2}$ ($F=3$) \leftrightarrow $6S_{1/2}$ ($F=4$) 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 $6S_{1/2}$ ($F=4$, $m_F=0$) π -transition were investigated. Measurements of the atomic sensor were performed at various laser powers and at high levels of microwave field strengths ranging from 500 V/m to 7.5 kV/m. The dependence of the bandwidth and amplitude of the Zeeman resonance at $6S_{1/2}$ ($F=3$, $m_F=0$) \leftrightarrow $6S_{1/2}$ ($F=4$, $m_F=0$) π -transition were investigated as a function of applied high-level microwave field strength. As a result of this, the superiority of bandwidth measurements to the amplitude measurements were discussed for the Zeeman transition of the DROR which will be used in the sensing of high level microwave fields.

Keywords: Electromagnetic fields, Laser-atom-microwave interaction,

1. Giriş

Elektromanyetik dalgaların lazer-atom-mikrodalga etkileşimine dayanan atomik sensörler yardımıyla algılanmaya çalışılması oldukça popüler bir konudur.

Atomik sensörler küçük boyutları, dielektrik yapıları, frekans seçici bir anten gibi davranarak harmoniksiz ölçüm yapabilmelerinin yanında düşük belirsizliklerle ölçüm yapabilme özelliklerine sahip olması nedeni ile tercih edilmektedirler. BIPM (Uluslar Arası Ölçüler ve Ağırlıklar Bürosu)'in SI (International System of Units) birimlerin yeniden tanımlanması ve evrensel kuantum sabitlerine bağlanması için çeşitli projeler yürütmesi de konuya olan ilgiyi artırmaktadır [1]. Ayrıca elektrik alan veya manyetik alan şiddetinin en hassas ölçülebilir SI birimi olan frekanstan elde edilmesine yönelik araştırma projelerini de desteklemektedir. Özellikle son yıllarda BIPM'in geleneksel CCEM (Elektrik ve Manyetizma Alanında Temsilciler Komitesi) toplantısında laboratuvar ortamında geliştirilen atomik sensörlerin elektromanyetik test ve kalibrasyon ortamlarında (TEM cell, Anechoic Chamber, Reverberation Chamber vb.) kullanılmasına yönelik kararlar alması da bu durumu destekleyici niteliktedir [2].

Literatürde atomik sensörler hakkında temel niteliğindeki ilk çalışmalarda sensör yapısı detaylı olarak araştırılmıştır [3-9]. Daha sonra atomik sensörlerin kuantum tabanlı mikrodalga güç ölçüm sistemi olabileceği görülmüş ve bir referans standart olabilmeye yönelik bilimsel çalışmalar yapılmıştır [10-14].

Ancak Cs atomun bir dış mikrodalga alan altında nasıl tepki verdiğine ve bir sensör olarak kullanıldığında hangi özelliklerinin ön plana çıktığına dair çalışmalar, bir diğer deyişle Cs atomun bir dış elektromanyetik alan altında davranışının karakterize edilmesine yönelik çok değerli çalışmalar ise [15-18]'de verilmiştir. Bunun yanı sıra atomik sensörlerin çeşitli özelliklerinin araştırıldığı, farklı gazların da elektromanyetik alan altında davranışını inceleyen, kullanım alanlarının genişletilmesine ve bir mikrodalga güç ölçüm standardı olmasına yönelik farklı yaklaşımlar ve yöntemlerle gerçekleştirilmiş çalışmalar [19-24]'de verilmiştir.

Günümüzde son teknoloji atomik sensörler hızla gelişmektedir [25-27]. Birçok çalışmada da pratik olarak kullanılmaya başlanmıştır [28, 29]. Bu çalışmaların DROR (Double Radio Optical Resonance) olarak bilinen çift radyo optik rezonanslarını çalıştırarak büyük bir kısmının konseptlerine bakıldığında mikrodalga alan şiddeti ile DROR olarak bilinen çift radyo optik rezonansın genliği arasındaki ilişki çalışılmıştır. Uzak alanda gerçekleşen bu ölçümlerde değişen mikrodalga alan şiddetinin çift radyo optik rezonansın genliği üzerinde meydana getirdiği değişimler incelenmiştir [16-18].

Ancak DROR rezonansının genliği üzerindeki çalışmalar ölçüm sonuçlarına direkt etki edebilen bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Bu dezavantajlardan bazıları, sinyal/gürültü (S/N ratio) oranı, ortamdaki optik gürültü, foto diyotun doyum etkileri olarak ortaya çıkmaktadır. Bir diğer deyişle ölçüm yapılan ortamın koşulları, kullanılan foto diyotun lineer çalışma aralığı ile ölçüm sistemlerinin kalitesinin ölçüm sonuçları üzerinde ciddi etkisi olmaktadır. Bu koşullara bağlı olarak da yeterli bir sinyal/gürültü oranı olmadığında yapılan ölçüm bu etkileri barındıracak ve ölçüm sonuçları üzerinde hissedilecektir. Aynı şekilde ölçüm esnasında ölçüm yapılan ortamın optik arka plan gürültüsünde değişimler meydana geldiğinde bu etkiler ölçüm sonuçları üzerinde daha da belirginleşecektir. Bir diğer konu ise optik soğurumun algılanmasında kullanılan foto diyotların doğrusalılıklarıdır. Foto diyotlar yapıldıkları yarı iletken malzemenin yapısına bağlı olarak belli dalga boylarında ve optik gücün belli bir dinamik aralığında lineer çalışmaktadır. Bunun dışında foto diyot yüksek optik güç değerlerinde doyuma girmekte ve bu tür değişen optik güçler bulunduğu ölçümlerde hataya neden olmaktadır.

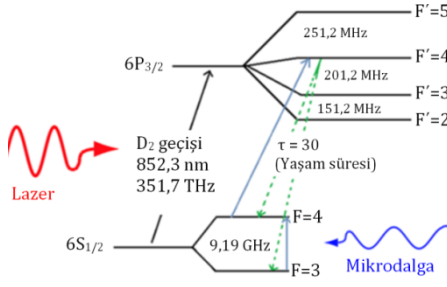
Buna karşın çift radyo optik rezonansın genliği yerine bant genişliği ile çalışmak bu tür hataların minimize edilmesinde fayda sağlayabilmektedir. Genlik ölçümlerinde olduğu gibi değişen mikrodalga alan şiddeti aynı zamanda çift radyo optik rezonansın bant genişliğinde de değişime neden olur. Rezonansın bant genişliği ölçümleri ise genlik eksenine yerine de frekans ekseninde gerçekleştirileceğinden daha önce yukarıda bahsedilen sinyal/gürültü oranı, optik ortam gürültüsü ve foto diyotun doyum etkisi gibi etkenler daha az hissedilecektir. Çünkü bant genişliği ölçümleri alınırken sinyalin genliğinin yarıya düştüğü noktalardan ölçülmektedir. Böylece genliğin tepe değerindeki değişimler yatay frekans ekseninde toplamda herhangi bir kayma yapmayacak veya genliğin yarıya düştüğü yerde bant genişliği ölçüleceğinden daha az hissedilecektir.

Yüksek seviyeli elektromanyetik dalgaların algılanmasında çift radyo optik rezonansın genlik ölçümlerinde daha önce yukarıda bahsedilen parametreler nedeniyle kararlı ölçümlerin alınması daha zordur. Aynı zamanda yüksek mikrodalga alan seviyelerinde genişleme çok daha fazla hissedileceğinden bant genişliği ölçümleri bu açıdan bakıldığında da ciddi anlamda katkı sağlayacaktır.

Bu çalışmada atomik sensörün, daha önce yapılmış ve [16-18]'de verilen çift radyo optik rezonansın genlik ölçümlerine dayalı karakterizasyon ölçümlerinden farklı olarak mikrodalga alanın şiddeti ile çift radyo optik rezonansın bant genişliği arasındaki ilişkiye odaklanılmıştır. Ayrıca Horn antenden belli bir d mesafesinde oluşan (0,5-7,5 kV/m) yüksek seviyeli elektromanyetik alan şiddeti gerçek zamanlı olarak herhangi bir ticari elektrik alan probu ile ölçülememektedir. Bu son yıllarda daha da önemli bir teknoloji haline gelen RC (Reverberation Chamber) odalarının kalibrasyon ve test aşamalarının farklı elektrik alan seviyelerinde yapılmasına, test esnasında oda içindeki alanın gerçek zamanlı ve deneysel olarak ölçülememesine neden olmaktadır. Bu nedenle laboratuvar ortamındaki cihazların teknik özellikleri ile sınırlı olmak üzere mümkün olan maksimum mikrodalga alan seviyelerinde ölçümler alınacaktır. Bu çalışmada Cs atomunun $6S_{1/2} (F=4) \leftrightarrow 6P_{3/2} (F=5, 4, 3)$ geçişlerinde meydana gelen rezonansları ile DC manyetik alan altında dejenere olduğu zaman ortaya çıkan Zeeman enerji geçişleri kullanılmıştır. Ölçümlerde ekranlı odada sabit 9,192 GHz frekansında bir horn anten yardımıyla yakın alanda 500 V/m'den 7,5 kV/m'ye kadar 500 V/m'lik adımlarla değişen yüksek seviyeli elektromanyetik alan oluşturulmuştur. Cs atomunun Zeeman enerji geçişlerinde meydana gelen güç genişlemesine odaklanılarak uygulanan elektromanyetik alan şiddeti ile Cs atomunun merkez Zeeman rezonansında meydana gelen bant genişliği arasındaki ilişki farklı lazer güçlerinde incelenmiştir.

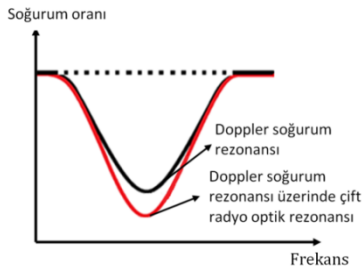
2. Teori

Sezyum atomları alkali atomlardır ve son yörüngelerinde bir valans elektronu bulunur. Alkali atomlar (Cs, Rb vb.) bu özelliklerinden dolayı H (Hidrojen) atomuna indirgenerek enerji seviyeleri ve etkileşim rezonansları çözülebilmektedir. Aynı zamanda Cs atomunun enerji seviyeleri arasındaki farklar lazer ışınlarının frekanslarına denk gelmektedir. Bu açıdan lazer atom etkileşimlerinin incelenbilmesi bakımından Cs atomları bu alanda oldukça sık kullanılmaktadır. Böyle bir çalışma için içerisinde Cs atomları bulunan kuvarz camdan yapılmış silindirik bir tüp üzerine 852,3 nm dalga boyunda lazer demeti gönderilir. Bu dalga boyu çalışmamızın temelini oluşturan ve Şekil 1 ile detaylandırılan Cs atomlarının D_2 enerji geçişine karşılık gelmektedir. Gönderilen lazer demeti Cs atomlarının $6S_{1/2} (F=4) \leftrightarrow 6P_{3/2} (F=5, 4, 3)$ geçişlerini yapacak şekilde taranmaktadır.



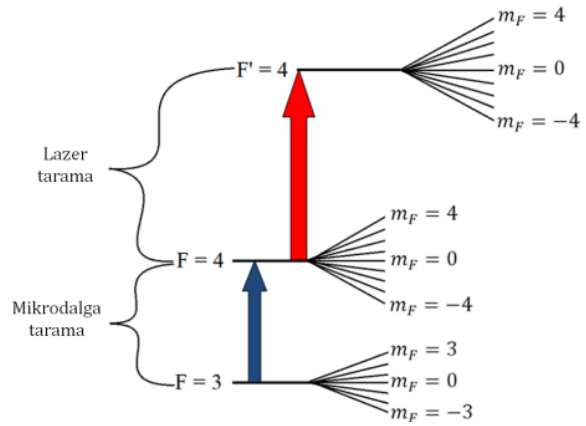
Şekil 1. Cs atomunun D₂ enerji geçişlerinde lazer ve mikrodalga etkileşimi gösterimi [30]

Lazerin frekansı, $6S_{1/2}$ ($F=4$) \leftrightarrow $6P_{3/2}$ ($F=4$) enerji geçişine denk gelecek frekansa ayarlandığında, cam küvet içindeki atomlar, $6S_{1/2}$ ($F=4$) seviyesinden $6P_{3/2}$ ($F=4$) olan üst seviyeye çıkarlar. Oradan da spontan olarak bu atomların bir kısmı geri $6S_{1/2}$ ($F=4$) seviyesine, diğer kısmı ise kullanılmayan $6S_{1/2}$ ($F=3$) seviyesine geçiş yaparlar. Bu optik pompalama sonucunda da temel seviye olan $6S_{1/2}$ ($F=4$) seviyesindeki atom sayısı azalır ve böylece bu seviyeden $6P_{3/2}$ ($F=4$) seviyesine ayarlanan lazer soğurumu da azalır. Yalnızca sabit 351,7 THz (852,3 nm) lazer frekans değerinde meydana gelen bu soğurum, sabit lazer gücünde kısa süre içerisinde dengeye gelir. Bundan sonra Şekil 1'den görüldüğü gibi $6S_{1/2}$ ($F=3$) \leftrightarrow $6S_{1/2}$ ($F=4$) seviyeleri arasındaki enerji farkına denk gelen 9,19 GHz frekansında bir mikrodalga alan uygulanır. Mikrodalga alanın frekans taraması $6S_{1/2}$ ($F=3$) ve $6S_{1/2}$ ($F=4$) geçişine denk gelen tam olarak 9,192631770 Hz frekansına geldiğinde, $6S_{1/2}$ ($F=3$) alt seviyedeki atomlar mikrodalga ışınmasını soğurarak üst seviye olan $6S_{1/2}$ ($F=4$) seviyesine geçerler. Bu geçiş sonucunda $6S_{1/2}$ ($F=4$) seviyesindeki atomların sayısı arttığı için $6S_{1/2}$ ($F=4$) \leftrightarrow $6P_{3/2}$ ($F=4$) geçişine ayarlanmış lazerin soğurumu artacaktır ve böylece sezyum küvetinden geçen lazerin soğurum rezonansı artış gösterecektir. Bu artış ise DROR (Double radio optical resonance) olarak bilinen çift radyo-optik rezonans olarak adlandırılmaktadır [31]. DROR rezonansının Doppler soğurum rezonansı üzerinde gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Mikrodalga alan uygulandığında meydana gelen DROR işaretinin Doppler soğurum rezonansı üzerinde gösterimi

DROR işaretini elde ettikten sonra ek olarak sezyum atomlarına normalde var olmayıp dış bir DC manyetik alan uygulandığında ortaya çıkan ve Şekil 3 ile verilen Zeeman enerji yarılımları meydana gelmektedir.



Şekil 3. Cs atomlarının D₂ enerji geçişinde Zeeman enerji yarılımları gösterimi

Uygulanan DC manyetik alanın şiddetinin seviyesine bağlı olarak $6S_{1/2}$ ($F=3$) ve $6S_{1/2}$ ($F=4$) seviyeleri $2F+1$ adet alt enerji seviyesine ayrılacaktır. Bu durumda $F=4$ ve $F'=4$ geçişlerinde $2F+1=2*4+1=9$ adet yani $m_F=+4...-4$ seviyelerinde, $F=3$ geçişinde ise $2F+1=2*3+1=7$ adet yani $m_F=+3...-3$ seviyelerinde Zeeman yarılması meydana gelecektir.

Zeeman alt enerji seviyeleri arasındaki fark, frekans ölçeğinde kHz veya MHz mertebelerinde bant genişliklerine sahiptir ve Eşitlik (1) ile verilen formül kullanılarak elde edilebilir.

$$\Delta E = -g_L \mu_B m_F B \quad (1)$$

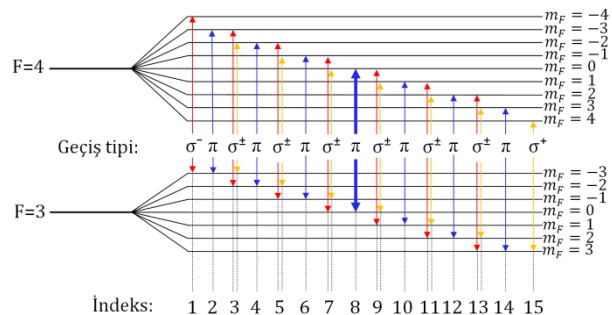
g_L : Lande' g-faktör
 μ_B : Bohr magnetonu
 m_F : Manyetik kuantum sayısı
B: DC manyetik alan

Meydana gelen Zeeman yarılımları arasında oluşan geçişlerin türleri aşağıda Eşitlik (2) ile verilen kurala göre belirlenmektedir.

$$\Delta m_F = m'_F - m_F \quad (2)$$

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

DC manyetik alan altında meydana gelen bu Zeeman yarılımları arasındaki geçişleri ve indekslenmiş temsili gösterimleri ile geçiş türleri Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Zeeman geçişlerinin sayısı ile geçiş türlerinin temsili gösterimi

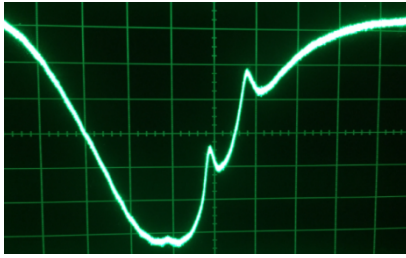
Burada 14 adet σ -geçişinden 12 tanesi çiftler halinde bulunmaktadır. Çift σ -geçişleri arasındaki frekans farkı bizim sistemimizin frekans hassasiyetinin çok ötesinde olduğundan toplamda $14 - 12/2 = 8$ adet σ -geçişi görülecektir. Şekil 4'ten de görüleceği üzere 8 adet σ -geçişi ve 7 adet de π -geçişi olmak üzere toplamda 15 adet geçiş görülecektir. $6S_{1/2}$ ($F=3$, $m_F=0$) \leftrightarrow $6S_{1/2}$ ($F=4$, $m_F=0$) geçişinde meydana gelen tüm Zeeman enerji yarımaları indekslenerek, geçiş türleri ve geçiş adetleri L_{m_i, m_f} gösterimi ile Tablo 1'de verilmiştir.

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

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

3. Deneysel Düzenek ve Ölçüm Yöntemi

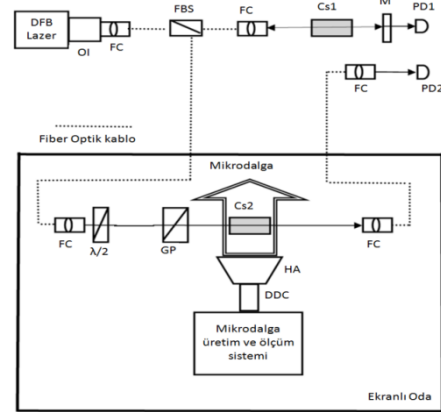
Ölçüm düzenekleri temelde bir optik ve bir mikrodalga kısmı olmak üzere iki ana düzenekten oluşmaktadır. Optik ölçüm düzenekleri de kendi içinde ikiye ayrılmaktadır. Optik ölçüm düzeneklerinin ilk kısmı ekranlı oda dışında bulunan optik masa üzerinde kurulu düzenektir. Bu kısım Şekil 5 ile verilen referans Cs1 küvetinde Doppler içi rezonansları görüntülemek amacıyla kullanılmaktadır. Çalışmanın temelini oluşturan ölçüm düzeneklerinin blok şeması Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 5. Cs1 küvetinde Doppler soğurumu spektrumu üzerinde Doppler soğurum içi rezonanslarının osiloskop ekranındaki görünümü

Optik masa üzerinde 852 nm dalga boyunda lazer ışını üretmek için bir DFB (Distributed Feedback Laser) lazer kaynağı kullanılmaktadır. 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 ayarlanmıştır. Şekil 6'da yer alan düzenekte Toptica firmasından DL100 model DFB lazerin çıkış demeti FC kolimatöre yönlendirilmiştir. Lazer ışığı fiber kablodan geçerek bir fiber ışın ayırıcı FBS ile 10/90 oranında ikiye ayrılmıştır. Lazer ışığının %10' luk kısmı referans Cs1

küvetine, diğer %90' luk kısmı ise ekranlı oda içerisindeki Cs2 küvetine gönderilir. Fiber optik ile sonlandırılmış bir FC kolimatörü kullanarak % 10' luk lazer ışını Cs1 küveti üzerinden geçirilir ve Doppler içi rezonansları gözlemlemek için M aynasından geçirilerek bir kısmı geri yansıtılır. Geri dönen ışık ile iletilen ışık birbiri ile tam olarak kesişecek şekilde hassas ayarlanır. İletilen lazer ışını ilk foto diyot (PD1) ile algılanır. Burada Cs1 referans küveti zamanla değişmeyen sabit bir lazer frekansı üretmek amacıyla daha sonra detayları verilecek olan kilitleme işleminde kullanılmaktadır. 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 ekranlı oda içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 6. Deneysel düzenek blok şeması

Ölçüm düzeneklerinin ikinci kısmı mikrodalga üretim sistemi ile birlikte 40 GHz'lik kesim frekansı olan ekranlı odada kurulmuştur. Şekil 6'da ekranlı oda içinde bulunan optik deney düzenekleri bir adet 2 (cm) x 2 (cm) boyutlarında silindirik Cs2 test tüpü, GP polarizatörü, bir adet $\lambda/2$ dalga düzlemi ve fiber kablolarla kolimatörlerden oluşmaktadır.

Daha önce optik deney düzeneklerinin birinci kısmında ışın bölücü FBS ile 10/90 oranında ikiye bölünmüştü. Lazer ışığının kalan %90'luk kısmı FC çıkışı 50 m' lik bir fiber kablo ile ekranlı oda içerisine gönderilir. Bu lazer ışını bir dalga düzlemi $\lambda/2$ 'den geçirilerek, GP ışın polarizatörüne oradan da Cs2 küveti içerisinden geçirilerek yine 50 m'lik ucunda FC çıkışı bulunan fiber optik kablo ile ekranlı oda dışında bulunan optik masa üzerindeki ikinci foto diyot olan PD2'ye getirilir. Burada ölçümler farklı lazer güçlerinde gerçekleştirileceği için optik filtreler kullanılarak Cs2 tüpü önünde ve PD2 foto diyotu girişinde ışık zayıflatma işlemleri ve optimizasyonu yapılmıştır.

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 6'da verilen düzenekte Doppler içi rezonansları görüntülemek ve kilitleme işlemini gerçekleştirmek için Cs1 referans tüpünün çıkışında bulunan PD1 ve PD2 foto diyotlarının çıkışları osiloskop ile gözlenmektedir.

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

$6S_{1/2}$ ($F=4$) 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 [32]. Burada kilitleme cihazının çıkışında ve DFB lazerin girişinde 20 dB zayıflatıcı kullanılmıştır. Düzenegın mikrodalga üretim kısmı bir mikrodalga işaret üretici, 500 W çıkış gücüne sahip mikrodalga güç yükseltici, Şekil 6'da DDC (Dual Directional Coupler) olarak verilen çift yönlü kuplör ve HA olarak gösterilen standart kazançlı horn anten içermektedir. Horn anten girişindeki net gücü ölçmek ve sezyum çalışma küveti üzerinde kontrollü bir elektrik alanı oluşturmak için DDC isimli yönlü bağlayıcı üzerinden güç değerleri ölçülür. Bilinen net güç ve bilinen anten kazancı ile Cs2 tüpünün bulunduğu noktada oluşturulan elektrik alan değeri Eşitlik (3) ile verilen formül kullanılarak kabaca teorik olarak hesaplanır. Maksimum elektromanyetik alanı oluşturabilmek için sezyum çalışma küveti (Cs2) küveti ve horn antenin ucu arasındaki mesafe yaklaşık 12 cm olarak ayarlanmıştır.

$$E = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{n_0 P_{net} G}{4\pi}} \quad (3)$$

Burada η_0 serbest uzay karakteristik empedansı 377Ω , P_{net} (W) anten girişindeki net güç değeri ve d (m) ise mesafedir. Sezyum çalışma küveti, horn antenin ön uç merkezini tam karşısına, zeminden 120 cm yükseklikte yerleştirilmiştir. Burada anten boyutu $D \approx 12$ cm ve $\lambda \approx 3,3$ cm ($f = 9,192$ GHz) dir.

Ölçüm düzenegının Zeeman yarılmasının üretildiği 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 cm'dir.

Ölçüm düzenegının mikrodalga kısmı ile diğer ölçüm cihazlarının (osiloskop ve işaret üreteçleri vb.) tamamı bilgisayar kontrollü bir sistemdir. Düzenekte ayrıca Cs2 tüpünün sıcaklığını sabit tutmak, anlık olarak sıcaklık bilgisi almak amacıyla bir sıcaklık kontrol sistemi kullanılmıştır.

Ekranlı oda içinde ölçümler sırasında lazerin polarizasyonu lineer olarak tutulmuş ve sezyum tüpü dikey polarize horn antenden yaklaşık 12 cm mesafede, antenin yakın alanında konumlandırılmıştır. Bu metot kullanılarak, yüksek seviyeli elektromanyetik dalgaların ölçümleri sürekli dalga (Continuous wave) modunda yapılmıştır.

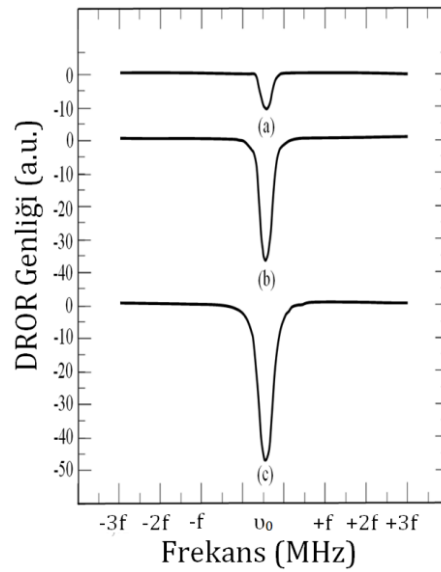
Ekranlı oda içerisinde bulunan ölçüm düzenegından örnek görünüm Şekil 7'de sunulmuştur. Verilen düzenekte, DC Helmholtz halkası ile çevrelenmiş sezyum tüpü, horn anten ve lazer giriş/çıkışına imkan veren fiber kafaları ekranlı oda içerisinde konumlandırılırken, lazer ve mikrodalga kaynakları ve diğer ilgili tüm elektronik cihazlar oda dışarısında konumlandırılmıştır.



Şekil 7. Ekranlı oda içerisindeki ölçüm düzenegının görünümü

Rezonans etkileşim sırasında, lazer ışınımı Cs atomlarını $6S_{1/2}$ ($F=4$) enerji düzeyinden $6S_{3/2}$ ($F=4$) uyarılmış düzeye sürmektedir. Uyarılmış atomlar tekrar $6S_{1/2}$ ($F=4$) ve $6S_{1/2}$ ($F=3$) taban durumuna anlık (spontan) emisyon ile düşerler. Bu nedenle, bu etkileşim $6S_{1/2}$ ($F=4$) düzeyinde atom sayısını azaltıyor olmasına karşın, atomların $6S_{1/2}$ ($F=3$) teki sayıları artmaktadır. Mikrodalga uygulandığında ise atomlar $6S_{1/2}$ ($F=3$) düzeyinden tekrar $6S_{1/2}$ ($F=4$) düzeyine sürülür. Uygulanan mikrodalga alanının genliği arttırıldığında $6S_{1/2}$ ($F=3$) seviyesinde bulunan atomlar tekrar $6S_{1/2}$ ($F=4$) seviyesine geçiş yapacağından $6S_{1/2}$ ($F=4$) seviyesindeki atom popülasyonu artacak dolayısıyla optik pompalama etkisiyle DROR rezonansı artacak, böylece foton soğurumu da artacaktır [18].

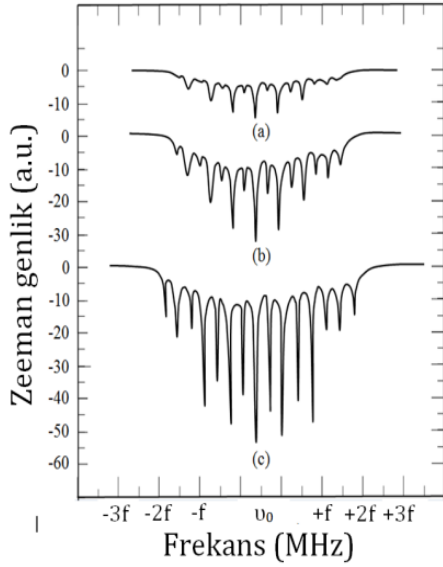
3,2 mW sabit lazer gücünde farklı mikro mikrodalga alan seviyelerinde $6S_{1/2}$ ($F=3$) \leftrightarrow $6S_{1/2}$ ($F=4$) geçişinde meydana gelen DROR rezonansının mikrodalga alan şiddetine göre değişimi Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Sabit 3,2 mW lazer gücünde, $6S_{1/2}$ ($F=3$) \leftrightarrow $6S_{1/2}$ ($F=4$) geçişinde ve farklı mikrodalga alan seviyeleri için DROR gösterimleri, (yatay eksen $\nu_0 \approx 9,192$ GHz ve $\Delta \nu \approx 10$ MHz) (a) 1 kV/m elektrik alan şiddeti, (b) 5 kV/m elektrik alan şiddeti, (c) 7,5 kV/m elektrik alan şiddeti

Araştırma kapsamında ekranlı oda içerisinde çalışılan mikrodalga alan seviyeleri alt sınır 500 V/m ile üst sınır 7,5 kV/m olarak belirlenmiştir. 500 W mikrodalga güç yükseltici -10 dBm'den sonra harmonik üretmeye ve doyuma girmektedir. Bu nedenle üst sınır 7,5 kV/m değerinde kesilmiştir. Ancak daha güçlü ve harmoniksiz mikrodalga güç yükselticileri kullanılarak bu seviye rahatlıkla arttırılabilir.

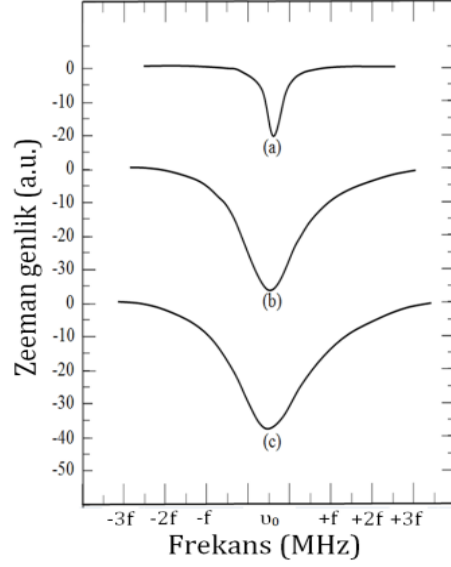
Mikrodalga alanlara karşın Zeeman yarılmasının gözlenmesi ile genlik ve bant genişliklerindeki değişimlerin ölçülmesi için bir Helmholtz halkası aracılığı ile ayrıca DC manyetik alan uygulanmıştır. DC manyetik alanın yönü mikrodalga alanının manyetik alanına ve lazer ilerleme yönüne paralel tutulmuştur. Uygulanan DC manyetik alan ile $6S_{1/2}$ ($F=3$) \leftrightarrow $6S_{1/2}$ ($F=4$) geçişinde meydana gelen toplam Zeeman komponentlerinin artan mikrodalga alan ile olan değişimini görsel olarak göstermek amacıyla sabit DC manyetik alan ve sabit lazer gücünde DROR sinyalinin üretilen Zeeman ayrışma spektrumu Şekil 9'da sunulmuştur. Gösterilen spektrumlar 3,2 mW sabit lazer gücünde ve sabit statik manyetik alan altında sırasıyla 1,5 kV/m, 3 kV/m and 7 kV/m mikrodalga alanlarında kayıt edilmiştir.



Şekil 9. 3,2 mWabit lazer gücünde, $6S_{1/2} (F=3) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4)$ geçişinde görülen 15 adet Zeeman rezonansının farklı mikrodalga alan seviyeleri için gösterimi (yatay eksen $v_0 \approx 9,192$ GHz ve $f \approx 10$ MHz) (a) 1,5 kV/m elektrik alan şiddeti, (b) 3 kV/m elektrik alan şiddeti, (c) 7 kV/m elektrik alan şiddeti

Şekilde 9'da görünen spektrumda sayısı 14 olan σ geçişlerinin 12 tanesi çiftler halinde bulunmaktadırlar ve birbirine çok yakın frekanslara sahiptir. Her bir çiftin bileşenleri arasındaki frekans, çok küçük olduğundan 14 adet σ geçişi yerine 8 adet σ geçişi osiloskop ekranında görünmektedir. 7 adet π geçişi ile beraber toplam 15 adet geçiş osiloskop ekranında gözlenmektedir.

Bu alanda yapılmış daha önceki çalışmalardan da bilindiği üzere statik manyetik alan değeri arttıkça Zeeman ayrışmasındaki her bir Zeeman rezonansı arasındaki mesafe artmaktadır [18]. Bir başka ifade ile Zeeman alt seviyeleri arasındaki bant genişliği artmakta, genliklerinde ise herhangi bir değişim olmamaktadır. Burada da ölçülmek istenen Zeeman rezonansı $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$ π -geçiş olduğu için statik manyetik alan yeterli seviyeye kadar artırılarak ve mikrodalga frekans taraması ayarlanarak sadece $m_F=0 \leftrightarrow m_F=0$ Zeeman rezonansı osiloskop ekranında gözlenmiş ve araştırılmıştır (Şekil 10). Zeeman seviyeleri arasındaki enerji farkı frekans ölçeğinde bant genişliği yaklaşık kHz mertebelerinde olduğundan artan bant genişliği nedeniyle diğer Zeeman rezonansları mikrodalga tarama aralığının dışında kalır ve yalnızca merkezde olduğu için yeri değişmeyen 8 indeks numaralı $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$ π -geçiş kalır. $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$ π -geçişine denk gelen DROR Zeeman rezonansının artan mikrodalga alan ile değişimi Şekil 10'da verilmiştir. Ölçümler yaklaşık 1100 μ T sabit DC manyetik alan ve sabit lazer gücünde yapılmıştır.



Şekil 10. 3,2 mWabit lazer gücünde $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$ π -geçişinin DROR sinyali ve genlik değişimi (yatay eksen $v_0 \approx 9,192$ GHz ve $f \approx 2$ MHz) (a) 1 kV/m alan şiddeti, (b) 5 kV/m elektrik alan şiddeti, (c) 7 kV/m elektrik alan şiddeti

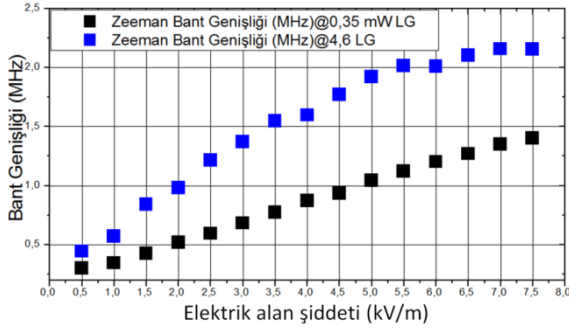
Şekil 10'da görüldüğü üzere artan mikrodalga alan genliği ile $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$ π -geçişinde Zeeman komponentinin genliği ve çizgi kalınlığı artış göstermektedir.

4. Sonuçlar

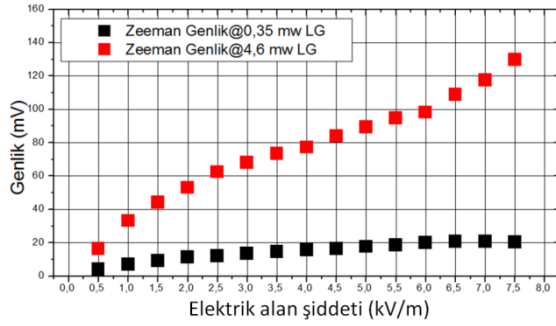
$6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$ π -geçiş olan merkez Zeeman komponentinin mikrodalga alana bağımlılığı araştırılmıştır. Mikrodalga alana karşılık elde edilen merkez Zeeman komponentinin genlik ve bant genişliği ölçüm sonuçları Şekil 11 ve Şekil 12'de sunulmuştur. Ölçüm sonuçlarından da görüldüğü üzere mikrodalga alandaki artış DROR işaretinin Zeeman komponentinin hem bant genişliğini hem de genliğini artırmaktadır. Mikrodalga alan şiddetinin artışıyla Zeeman merkez komponentinin bant genişliğindeki (çizgi kalınlığı) artışın düşük lazer güçlerinde aşağıda Eşitlik (4) ile verilen kuralla uyması beklenmektedir [31].

$$\Delta\omega \propto \frac{a}{2} + \frac{a}{2} \sqrt{1 + \frac{E^2}{b}} \quad (4)$$

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. Farklı lazer güçlerinde $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$ π -geçişinin DROR sinyalinin bant genişliğinin mikrodalga alan şiddetine bağlılığı

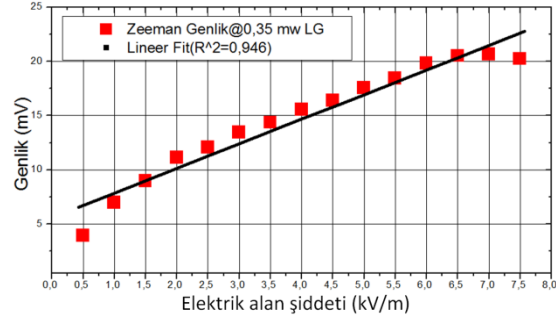


Şekil 12. Farklı lazer güçlerinde $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$ π -geçişinin DROR sinyalinin genliğinin mikrodalga alan şiddetine bağlılığı

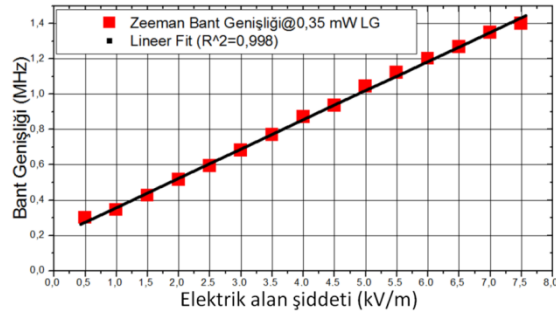
Çalışma kapsamında Şekil 11 ile Şekil 12’de sunulan grafiklerde $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$ π -geçişinin bant genişliği ve genliğinin yüksek elektromanyetik alan altında davranışını anlamak amacıyla farklı lazer ve mikrodalga güçlerine bağlılığı araştırılmıştır. Bu araştırma yaklaşık 1100 μ T statik alanda, farklı lazer güçlerinde ve mikrodalga alan seviyelerinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde sezyum tüpü antenin yakın alan bölgesinde olup net bir şekilde alan değerini bilebilmek mümkün değildir ve seviyelerde herhangi bir elektrik alan probun ölçme aralığının çok üstünde olduğundan ancak teorik olarak hesaplanabilmektedir. Bu ölçümlerde lazer güçleri sırasıyla 0,35 mW, 4,6 mW olarak seçilmiştir. Mikrodalga alan şiddetleri ise her bir lazer gücü için sırasıyla 0,5 kV/m, 1 kV/m, 1,5 kV/m, 2 kV/m, 2,5 kV/m, 3 kV/m, 3,5 kV/m, 4 kV/m, 4,5 kV/m, 5 kV/m, 5,5 kV/m, 6 kV/m, 6,5 kV/m, 7 kV/m, 7,5 kV/m değerlerinde uygulanmıştır. Bant genişliği ölçümleri genliğin yarıya düştüğü yerde osiloskobun “width” detektörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Genlik ölçümlerinde ise sinyalin tepe noktası ölçülmüş olup osiloskobun “V amplitude” detektörü kullanılmıştır.

Şekil 11 ve Şekil 12 ile verilen ölçüm sonuçları şu şekilde yorumlanabilir. Sabit lazer gücünde, mikrodalgada alandaki artış $6S_{1/2} (F=3)$ ve $6S_{1/2} (F=4)$ enerji düzeyleri arasında daha fazla atomik pompalamaya sebep olmaktadır. $6S_{1/2} (F=4) \leftrightarrow 6P_{3/2} (F=4)$ seviyeleri arasında kilitlenen lazer daha fazla atom ile etkileşmekte ve optik soğurumu artırmaktadır. Optik soğurumdaki bu artış nedeniyle $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$ π -geçisi enerji düzeyindeki Zeeman komponent seviyesi de artmaktadır.

Düşük lazer güç seviyelerindeki (0,35 mW) işaret genliğindeki artış daha lineer iken optik pompalama işlemindeki doyum işleminden dolayı yüksek lazer güç seviyesinde, 4,6 mW lazer gücünden itibaren daha erken lineer olmayan artışlar meydana gelmektedir. Bunun nedeni yüksek lazer güçlerinden kaynaklanan optik pompalamanın etkisiyle $6S_{1/2} (F=4)$ seviyesinde bulunan atom sayısı, mikrodalganın etkisiyle bu seviyeye aktarılan atom sayısından çok daha fazla azalmaktadır. Bu nedenle de $6S_{1/2} (F=4) \leftrightarrow 6S_{3/2} (F=4)$ seviyeleri arasında meydana gelen geçişler dengelenememektedir. Bu durum rezonansların genlik ve bant genişliklerinde lineer olmayan artışlar meydana getirir. Bu nedenle foto diyotta tespit edilen işaret, lazer gücüne bağlı olarak lineer olmayan bir şekilde artar. Başka bir deyişle aslında yüksek lazer güçlerinde rezonanslardaki genişleme yalnızca mikrodalga alanın etkisi ile değil lazer ışınından da kaynaklanmaktadır. Rezonans geçişte lazerin gücünden kaynaklı bir etki olmaması için lazer gücü olabildiğince düşük tutulmalıdır. Bu etki Şekil 13 ve Şekil 14’te daha iyi anlaşılmaktadır.



Şekil 13. 0,35 mW sabit lazer gücünde $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$ π -geçişinin DROR sinyalinin genliğinin mikrodalga alan şiddetine bağlılığı



Şekil 14. 0,35 mW sabit lazer gücünde $6S_{1/2} (F=3, m_F=0) \leftrightarrow 6S_{1/2} (F=4, m_F=0)$ π -geçişinin DROR sinyalinin bant genişliğinin mikrodalga alan şiddetine bağlılığı

0,35 mW lazer gücünde alınan bu ölçümlerde lazer gücünün etkisi minimize edilerek mikrodalga alanın lineer dinamik ölçüm aralığı arttırılmıştır. Bu lineerlik bant genişliği ölçümlerinde (Şekil 14) daha fazla gözlenmektedir.

Mikrodalga alan şiddeti 0,5 kV/m değerinden 7,5 kV/m değerine arttırıldığında Zeeman DROR rezonansının çizgi kalınlığı alan genişlemesi (power broadening) etkisi sonucunda 0,3 MHz değerinden 1,4 MHz değerine kadar lineer olarak genişlemiştir. Şekil 14’te rezonansın çizgi kalınlığı genişlemesi ölçümünde lineer fit yapıldığında R^2

değeri 0,998 olarak bulunmuştur. Şekil 13'teki genlik ölçümlerinden de görüldüğü gibi çizgi kalınlığı ölçümleri genlik ölçümlerine göre daha lineer davranış sergilemektedir. Şekil 13'te sunulan genlik ölçümlerindeki R^2 değeri 0,946 olarak bulunmuştur.

DROR işaretinin Zeeman komponentinin bant genişliği ölçümleri ($k=2$ kapsam faktörü ve %95 güven aralığında) 3 dB ölçüm belirsizliği içinde gerçekleştirilmiştir. Burada 2 dB değeri oluşturulan mikrodalga alanın belirsizliği, geriye kalan 1 dB ise bant genişliğinin ölçülmesinde foto diyotun doğrusallığı, osiloskobun frekans ölçme belirsizliği ve genlik ölçümlerinin standart sapması gibi belirsizlik bileşenlerinden gelmektedir. DROR işaretinin Zeeman komponentinin genlik ölçümleri ise 4 dB ($k=2$ kapsam faktörü ve %95 güven aralığında) belirsizlik içinde gerçekleştirilmiştir. Burada yine oluşturulan mikrodalga alanın belirsizliği 2 dB iken daha önce de bahsedildiği gibi optik arka plan gürültüsü, sinyal/gürültü oranı lazer gücündeki değişimler ve foto diyotun doyum etkileri rezonansın genlik ölçümlerinde daha fazla etkili olduğundan bu kısımdan gelen belirsizlik değeri ise 2 dB'dir.

Sonuç olarak geliştirilen atomik sensör uygun lazer güçlerinde dinamik aralığı değiştirilerek yüksek seviyeli mikrodalga alanları algılamak için kullanılabilir özelliğine sahiptir. Ancak çok yüksek lazer güçlerinde doyum etkileri gözlenebileceğinden sensörün çalışacağı dinamik aralık oldukça iyi tanımlanmalıdır.

5. Tartışma

Sonuçlar değerlendirildiğinde atomik sensörün dinamik ölçüm aralığının lazer gücü ile değiştirilebileceği görülmüştür. Dinamik aralık uygun bir şekilde ayarlandığında yüksek mikrodalga alanlar ile Zeeman komponentinin genlik ve bant genişlikleri arasındaki lineer ilişkinin korunduğu belirlenmiştir. Daha önce makalenin giriş kısmında vurgulandığı gibi mikrodalga alan ölçümlerinin DROR rezonansının bant genişliğine göre yapılması daha avantajlı olmuştur. Bu anlamda beklendiği gibi bant genişliği ölçümlerinin genlik ölçümlerine nazaran daha lineer artış gösterdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak bu çalışmada geliştirilen yöntem atomik sensörler ile yüksek seviyeli elektromanyetik alanların algılanması ve uygulama ölçümleri açısından faydalı olabilir.

Kaynaklar

- [1] Web 1, <https://www.bipm.org/en/measurement-units/rev-si/>, 2017.
- [2] Web2, <https://www.bipm.org/cc/CCEM/Allowed/30/CC-EM-17-Report-NIST.pdf>, 2017.
- [3] Rabi I. I., "Space quantization in a gyrating magnetic field", Phys. Rev., 51, 652-654, 1937.
- [4] Kastler A., "Production et detection optique d'une inegalite de population", J. Phys. Radium, 11, 255-265, 1950.
- [5] Dehmelt H. G., "Modulation of a light beam by precessing absorbing atoms", Phys. Rev., 105, 1924-1925, 1957.
- [6] Bell W. E., Bloom A., "Optical detection of magnetic resonance in alkali metal vapor", Phys. Rev., 107, 1559-1565, 1957.
- [7] Ali A. W., Griem H. R., "Theory of Resonance Broadening of Spectral Lines by Atom-Atom Impacts" Phys. Rev.140, A1044 – Published 15 November 1965; Erratum Phys. Rev., 144, 366, 1966.
- [8] Aleksandrov E. B., Mamyrin A. B., Naumov A. P., "Hfs-magnetometer for absolute measurement of magnetic induction of weak magnetic-fields", Meas. Tech., 20, 1048-1051, 1977.
- [9] Happer W., "Optical pumping" Rev. Mod. Phys., 44, 169-249, 1972.
- [10] Osterwalder A., Merkt F., "Using high Rydberg states as electric field sensors", Phys. Rev. Lett., 82, 1831-1834, 1999.
- [11] Donley E. A., Crowley T. P., Heavner T. P., Riddle B. F., "Quantum-based microwave power measurement performed with a miniature atomic fountain", Proc. IEEE Int. Frequency Control Symp., 135-137, 2003.
- [12] Savukov I. M. S. S., Romalis M. V., Sauer K. L., "Tunable atomic magnetometer for detection of radio-frequency magnetic fields", Phys. Rev. Lett., 95, 063004, 2005.
- [13] Crowley T. P., Donley E. A., Heavner T. P., "Quantum-based microwave power measurements: Proof-of-concept experiment", Rev. Sci. Instrum., 75, 2575-2580, 2004.
- [14] Paulusse D. C., Rowell N. L., Michaud A., "Accuracy of an atomic microwave power standard", IEEE Trans. Instrum. Meas., 54, 2, 692-695, 2005.
- [15] 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.
- [16] Çetintaş M., Hamid R., Şen O., Çakır S., "Characterization of a far-field microwave magnetic field strength sensor based on double radiooptical resonance," IEEE Trans. Electromagn. Compat., 52, 1, 21-31, 2010.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Vanier J., Godone A., Levi F., "Coherent population trapping in cesium: Dark lines and coherent microwave emission", Phys. Rev. A, 58, 3, 2345-2358, 1998.
- [20] Ripka P., Janosek M., "Advances in magnetic field sensors," IEEE Sensors J., 10, 6, 1108-1116, 2010.
- [21] Kitching J., Knappe S., Donley E. A., "Atomic sensors-a review", IEEE Sensors J., 11, 9, 1749-1758, 2011.
- [22] Zibrov A. S., Zhukov A. A., Yakovlev V. P., Velichansky V. L., "Shape of the signal of double radio-optical resonance in 85Rb atomic vapors in strong fields" JETP Lett., 83, 4, 136-140, 2006.
- [23] Litvinov A., Kazakov G., Matisov B., Mazets I., "Double radio-optical resonance in 87Rb atomic vapour in a finite-size bufferless cell", J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys., 41, 125401-1-8, 2008.
- [24] Paulusse D., Rowell N., Michaud A., "Realization of an atomic microwave power standard", Proc. Conf.

- Precision Electromagn. Meas., Ottawa, Canada, 194–195, 2002.
- [25] Holloway C. L., Gordon J. A., Simons M. T., Fan H., Kumar S., Shaffer J. P., Anderson D. A., Schwarzkopf A., Miller S. A., Thaicharoen N., Raithe G., “Atom-based RF electric field measurements: An initial investigation of the measurement uncertainties”, *Electromagnetic Compatibility IEEE International Symposium*, 467-472, 2015.
- [26] 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.
- [27] Holloway C. L., Gordon J.A., Jefferts S., Schwarzkopf A., Anderson D. A., Miller S. A., Thaicharoen N., Raithe G., “Broadband Rydberg Atom-Based Electric-Field Probe for SI-Traceable Self-Calibrated Measurements”, *Antennas and Propagation IEEE Transactions*, 62, 12, 6169-6182, 2014.
- [28] Song Z., Feng Z., Liu X., Li D., Zhang H., Liu J., Zhang L., (2017), “Quantum-Based Determination of Antenna Finite Range Gain by Using Rydberg Atoms”, *Antennas and Wireless Propagation Letters IEEE*, 16, 1589-1592.
- [29] 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.
- [30] Steck D. A., “Cesium D Line Data”, revision 2.1.4, 2010.
- [31] Demtröder W., “Laser Spectroscopy”, 2nd ed., Springer-Verlag, New York, 1996.
- [32] 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.