



**T. C.
SIVAS CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK VE EĞİK MANYETİK ALAN ALTINDA ÜÇLÜ GaAs/
Ga_{1-x}Al_xAs KUANTUM KUYULARININ ELEKTRONİK VE OPTİK
ÖZELLİKLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**FARUK BAŞPINAR
(201492031069)**

Fizik Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Rana ÖZBAKIR

SİVAS

2019

Faruk BAŞPINAR'ın hazırladığı ve “**Elektrik Ve Eğik Manyetik Alan Altında Üçlü GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs Kuantum Kuyularının Elektronik Ve Optik Özellikleri**” adlı bu çalışma aşağıdaki jüri tarafından **Fizik Ana Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı **Doç. Dr. Rana ÖZBAKIR**
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Jüri Üyesi **Prof. Dr. İsmail SÖKMEN**
Dokuz Eylül Üniversitesi

Jüri Üyesi **Prof. Dr. Esin KASAPOĞLU**
Sivas Cumhuriyet Üniversitesi

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak onaylanmıştır.

Prof. Dr. Özlem Pelin CAN

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Bu tez, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Senatosu'nun 20.08.2014 tarihli ve 7 sayılı kararı ile kabul edilen Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırlanmıştır



Bu tez Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (CÜBAP) Komisyonu tarafından F606 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.



Bütün hakları saklıdır.

Kaynak göstermek koşuluyla alıntı ve gönderme yapılabilir.

© Faruk BAŞPINAR, 2019

ETİK

Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tez Yazım Kılavuzu (Yönerge)'nda belirtilen kurallara uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- ✓ Bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- ✓ Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- ✓ Başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere, bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu ve atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- ✓ Bütün bilgilerin doğru ve tam olduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- ✓ Tezin herhangi bir bölümünü, Sivas Cumhuriyet Üniversitesi veya bir başka üniversitede, bir başka tez çalışması olarak sunmadığımı; beyan ederim.

26.08.2019

Faruk BAŞPINAR

KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR

Bilgi ve deneyimlerinden sürekli yararlandığım, tezin her aşamasında yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Rana ÖZBAKIR'a çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışması süresince bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fizik Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Esin KASAPOĞLU'na ve bu günlere gelmemde her türlü fedakârlığı ve yardımı gösteren babama, anneme ve eşime teşekkür ederim.



ÖZET

ELEKTRİK VE EĞİK MANYETİK ALAN ALTINDA ÜÇLÜ GaAs/ Ga_{1-x}Al_xAs KUANTUM KUYULARININ ELEKTRONİK VE OPTİK ÖZELLİKLERİ

Faruk BAŞPINAR

Yüksek Lisans Tezi

Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Rana ÖZBAKIR

2019, 73+xv sayfa

Bu çalışmada üç kuantum kuyusundan oluşan *GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs* yarıiletken heteroyapıya, büyütme doğrultusunda (z) elektrik alan ve x eksenine ile θ açısı yapacak şekilde eğik manyetik alan uygulanarak sistemin enerji özdeğerleri ve dalga fonksiyonları, etkin kütle yaklaşımı kullanılarak Schrödinger denkleminin analitik çözümü ile bulunmuştur. Ayrıca; elektrik ve eğik manyetik alanların ve bunların değişimiyle de kuyu parametrelerinin, enerji özdeğerleri ve bandıçları elektronik geçişler için lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Optik geçişler için kompakt yoğunluk matris yaklaşımı kullanılmıştır. Sistemin optik özelliklerinin, kuyu parametrelerine, uygulanan dış alan şiddetlerine ve uygulanma doğrultularına duyarlı olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: üçlü kuantum kuyusu, optik özellikler, elektrik alan, eğik manyetik alan, lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisleri.

ABSTRACT

ELECTRONIC AND OPTICAL PROPERTIES OF TRIPLE QUANTUM WELLS $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$ UNDER EXTERNAL ELECTRIC AND TILTED MAGNETIC FIELDS

Faruk BAŞPINAR

Master of Science Thesis

Department of Physics

Supervisor: Doç. Dr. Rana ÖZBAKIR

2019, 73+xv pages

In this study, the electric field is applied to the $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$ semiconductor heterostructure with three quantum wells in the direction of magnification (z) and the tilted magnetic field for θ angles with the x axis. The energy eigenvalues and wave functions of the system are found with the analytical solution of Schrödinger equation, using the effective mass approximation. In addition, the effects of the electric and tilted magnetic fields and the well parameters obtained by their changes on the linear, nonlinear and toplam refractive indices for energy eigenvalues and intersubband electronic transitions are investigated. The compact density-matrix approach is used for optical transitions. It is realized that the optical properties of the system are sensitive to the well parameters, external field strengths and application directions.

Key Words: triple quantum wells, optical properties, electric field, tilted magnetic field, linear, nonlinear and toplam refractive indexes.

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|---|-------|
| KATKI BELİRTME VE TEŞEKKÜR..... | vi |
| ÖZET | vii |
| ABSTRACT | viii |
| ŞEKİLLER DİZİNİ | x |
| ÇİZELGELER DİZİNİ..... | xiv |
| SİMGELER | xv |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. DÜŞÜK BOYUTLU YAPILAR..... | 4 |
| 3. HETEROYAPILAR..... | 6 |
| 4. ÜÇ KUANTUM KUYUSUNDAN OLUŞAN $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$ HETEROYAPIDA ELEKTRİK VE MANYETİK ALAN ETKİSİ..... | 8 |
| 4.1 Teori..... | 10 |
| 5. KIRILMA | 31 |
| 5.1 Teori..... | 33 |
| 5.2 Veriler ve yorumlar..... | 34 |
| 6. SONUÇLAR..... | 70 |
| KAYNAKLAR | 71 |
| ÖZGEÇMİŞ | 73 |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | | |
|-------------|--|----|
| Şekil 2. 1 | Yarı iletken bir malzemenin band yapısı | 4 |
| Şekil 3. 1 | İki farklı yarı iletkenin oluşturduğu heteroyapılardaki bant süreksizliği tipleri. | 7 |
| Şekil 4. 1 | Üçlü kuantum kuyusu | 8 |
| Şekil 4. 2 | Tek kuantum kuyusu. | 10 |
| Şekil 4. 3 | $B = 10T, \theta=45^\circ, F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 16 |
| Şekil 4. 4 | $B = 10T, \theta=60^\circ, F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 16 |
| Şekil 4. 5 | $B = 10T, \theta=75^\circ, F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 17 |
| Şekil 4. 6 | $B = 15T, \theta=45^\circ, F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 17 |
| Şekil 4. 7 | $B = 15T, \theta=60^\circ, F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 18 |
| Şekil 4. 8 | $B = 15T, \theta=75^\circ, F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 18 |
| Şekil 4. 9 | $B = 20T, \theta=45^\circ, F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 19 |
| Şekil 4. 10 | $B = 20T, \theta=60^\circ, F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 19 |
| Şekil 4. 11 | $B = 20T, \theta=75^\circ, F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 20 |
| Şekil 4. 12 | $B = 10T, \theta=60^\circ$ ve $F=0$ değerinde potansiyel profilinin (a) $z_0' = 0$ (siyah), $z_0' = 0.85$ (kırmızı), ve $z_0' = 2.35$ (mavi)'e (b) $z_0' = 0$ (siyah), $z_0' = -0.85$ (kırmızı) ve $z_0' = -2.35$ (mavi) değerlerindeki çizimi. | 22 |
| Şekil 4. 13 | $B = 10T, \theta=60^\circ$ ve $F=50$ kV/cm değerinde potansiyel profilinin (a) $z_0' = 0$ (siyah), $z_0' = 2.35$ (kırmızı) (b) $z_0' = 0$ (siyah) ve $z_0' = -2.35$ (kırmızı) değerlerinde çizimi. | 23 |
| Şekil 4. 14 | $B = 10T, \theta=60^\circ$ ve $F= -50$ kV/cm değerinde potansiyel profilinin (a) $z_0' = 0$ (siyah) ve $z_0' = 2.35$ (kırmızı) (b) $z_0' = 0$ (siyah) ve $z_0' = -2.35$ (kırmızı) değerlerinde çizimi. | 24 |
| Şekil 4. 15 | $B = 10T, \theta=45^\circ, F=50$ kV/cm için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 26 |
| Şekil 4. 16 | $B = 10T, \theta=60^\circ, F=50$ kV/cm için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 26 |
| Şekil 4. 17 | $B = 10T, \theta=75^\circ, F=50$ kV/cm için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 27 |
| Şekil 4. 18 | $B = 15T, \theta=45^\circ, F=50$ kV/cm için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 27 |
| Şekil 4. 19 | $B = 15T, \theta=60^\circ, F=50$ kV/cm için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 28 |
| Şekil 4. 20 | $B = 15T, \theta=75^\circ, F=50$ kV/cm için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 28 |

| | | | | |
|-------------|---|----------------------|--|----|
| Şekil 4. 21 | $B = 20T, \theta=45^\circ$ | $F=50 \text{ kV/cm}$ | üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 29 |
| Şekil 4. 22 | $B = 20T, \theta=60^\circ$ | $F=50 \text{ kV/cm}$ | üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 29 |
| Şekil 4. 23 | $B = 20T, \theta=75^\circ$ | $F=50 \text{ kV/cm}$ | üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi. | 30 |
| Şekil 5. 1 | $B=10T, \theta=45^\circ$ | $F=0$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 34 |
| Şekil 5. 2 | $B=10T, \theta = 60^\circ$ | $F=0$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 34 |
| Şekil 5. 3 | $B=10T, \theta = 75^\circ$ | $F=0$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 35 |
| Şekil 5. 4 | $B=15T, \theta = 45^\circ$ | $F=0$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 35 |
| Şekil 5. 5 | $B=15T, \theta = 60^\circ$ | $F=0$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 36 |
| Şekil 5. 6 | $B=15T, \theta = 75^\circ$ | $F=0$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 36 |
| Şekil 5. 7 | $B=20T, \theta = 45^\circ$ | $F=0$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 37 |
| Şekil 5. 8 | $B=20T, \theta = 60^\circ$ | $F=0$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 37 |
| Şekil 5. 9 | $B=20T, \theta = 75^\circ$ | $F=0$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 38 |
| Şekil 5. 10 | 1-2 geçişi için farklı manyetik alan değerlerinde ($B=10T, B=15T, B=20T$) eğiklik açısının fonksiyonu olarak ΔE enerji farkı grafiği. | | | 38 |
| Şekil 5. 11 | $B=10T, \theta = 45^\circ$ | $F=50 \text{ kV/cm}$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 40 |
| Şekil 5. 12 | $B=10T, \theta = 60^\circ$ | $F=50 \text{ kV/cm}$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 40 |
| Şekil 5. 13 | $B=10T, \theta = 75^\circ$ | $F=50 \text{ kV/cm}$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 41 |
| Şekil 5. 14 | $B=15T, \theta = 45^\circ$ | $F=50 \text{ kV/cm}$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 41 |
| Şekil 5. 15 | $B=15T, \theta = 60^\circ$ | $F=50 \text{ kV/cm}$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 42 |
| Şekil 5. 16 | $B=15T, \theta = 75^\circ$ | $F=50 \text{ kV/cm}$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 42 |
| Şekil 5. 17 | $B=20T, \theta = 45^\circ$ | $F=50 \text{ kV/cm}$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 43 |
| Şekil 5. 18 | $B=20T, \theta = 60^\circ$ | $F=50 \text{ kV/cm}$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 43 |
| Şekil 5. 19 | $B=20T, \theta = 75^\circ$ | $F=50 \text{ kV/cm}$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 44 |
| Şekil 5. 20 | $B=10T, B=15T, B=20T$ iken $\theta = 45^\circ$ | $F=0$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 45 |
| Şekil 5. 21 | $B=10T, B=15T, B=20T$ iken $\theta = 60^\circ$ | $F=0$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 45 |
| Şekil 5. 22 | $B=10T, B=15T, B=20T$ iken $\theta = 75^\circ$ | $F=0$ | foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 46 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 5. 23 | $\theta = 45^\circ, \theta = 60^\circ, \theta = 75^\circ$ iken $B=10T, F=0$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 47 |
| Şekil 5. 24 | $\theta = 45^\circ, \theta = 60^\circ, \theta = 75^\circ$ iken $B=15T, F=0$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 47 |
| Şekil 5. 25 | $\theta = 45^\circ, \theta = 60^\circ, \theta = 75^\circ$ iken $B=20T, F=0$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 48 |
| Şekil 5. 26 | $F=0$ ve $F=50k V/cm$ iken $B=10T, \theta = 45^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 49 |
| Şekil 5. 27 | $F=0$ ve $F=50k V/cm$ iken $B=10T, \theta = 60^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 49 |
| Şekil 5. 28 | $F=0$ ve $F=50k V/cm$ iken $B=10T, \theta = 75^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 50 |
| Şekil 5. 29 | $F=0$ ve $F=50k V/cm$ iken $B=15T, \theta = 45^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 50 |
| Şekil 5. 30 | $F=0$ ve $F=50k V/cm$ iken $B=15T, \theta = 60^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 51 |
| Şekil 5. 31 | $F=0$ ve $F=50k V/cm$ iken $B=15T, \theta = 75^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 51 |
| Şekil 5. 32 | $F=0$ ve $F=50k V/cm$ iken $B=20T, \theta = 45^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 52 |
| Şekil 5. 33 | $F=0$ ve $F=50k V/cm$ iken $B=20T, \theta = 60^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 52 |
| Şekil 5. 34 | $F=0$ ve $F=50k V/cm$ iken $B=20T, \theta = 75^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 53 |
| Şekil 5. 35 | $B=10T, F=0, \theta = 45^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 54 |
| Şekil 5. 36 | $B=10T, F=0, \theta = 60^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 54 |
| Şekil 5. 37 | $B=10T, F=0, \theta = 75^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 55 |
| Şekil 5. 38 | $B=15T, F=0, \theta = 45^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 55 |
| Şekil 5. 39 | $B=15T, F=0, \theta = 60^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 56 |
| Şekil 5. 40 | $B=15T, F=0, \theta = 75^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 56 |
| Şekil 5. 41 | $B=20T, F=0, \theta = 45^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 57 |
| Şekil 5. 42 | $B=20T, F=0, \theta = 60^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 57 |
| Şekil 5. 43 | $B=20T, F=0, \theta = 75^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 58 |
| Şekil 5. 44 | $B=10T, F=50kV/cm, \theta = 45^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 59 |
| Şekil 5. 45 | $B=10T, F=50kV/cm, \theta = 60^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 59 |
| Şekil 5. 46 | $B=10T, F=50kV/cm, \theta = 75^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 60 |
| Şekil 5. 47 | $B=15T, F=50kV/cm, \theta = 45^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 60 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Şekil 5. 48 | $B=15T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 60^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 61 |
| Şekil 5. 49 | $B=15T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 75^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 61 |
| Şekil 5. 50 | $B=20T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 45^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 62 |
| Şekil 5. 51 | $B=20T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 60^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 62 |
| Şekil 5. 52 | $B=20T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 75^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 63 |
| Şekil 5. 53 | $B=10T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 45^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 64 |
| Şekil 5. 54 | $B=10T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 60^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 64 |
| Şekil 5. 55 | $B=10T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 75^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 65 |
| Şekil 5. 56 | $B=15T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 45^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 65 |
| Şekil 5. 57 | $B=15T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 60^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 66 |
| Şekil 5. 58 | $B=15T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 75^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 66 |
| Şekil 5. 59 | $B=20T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 45^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 67 |
| Şekil 5. 60 | $B=20T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 60^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 67 |
| Şekil 5. 61 | $B=20T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 75^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri. | 68 |

ÇİZELGELER DİZİNİ

| | Sayfa |
|---|-------|
| Çizelge 2.1 Düşük boyutlu yapıların serbestlik derecesi ve sınırlama doğrultu sayıları | 5 |
| Çizelge 4.1 Manyetik alanın 10T, 15T, 20T ve θ 'nın 45° , 60° , 75° değerleri için ilk altı boyutsuz enerji düzeyi değerleri. | 15 |



SİMGELER

| | |
|--------------------|--|
| $\vec{A}(\vec{r})$ | ; Vektör Potansiyeli |
| a_H | ; Manyetik Uzunluk = $(\sqrt{\frac{\hbar}{m^*\omega}})$ (Å) |
| c | ; Işık Hızı = $2,99792458 \cdot 10^8$ m/s |
| e | ; Elektron Yüğü = $-1,602 \cdot 10^{-19}$ C |
| E_g | ; Yasak Band aralığı |
| E_v | ; Valans Bandı |
| E_c | ; İletim Bandı |
| \hbar | ; Planck Sabiti = $1,05457266 \cdot 10^{-34}$ J.s |
| $k_{x,y,z}$ | ; Dalga Vektörü |
| m_o | ; Serbest Elektron Kütlesi = 0,0667 |
| m_e | ; Elektron Kütlesi = $9,10956 \cdot 10^{-31}$ kg |
| m^* | ; Elektron Etkin Kütlesi = $m_o m_e = 0,607607 \cdot 10^{-31}$ kg |
| n_R | ; Kırıcılık İndisi = 3,2 |
| I | ; Işık Şiddeti = $2 \cdot 10^9$ W/m ² |
| p | ; Momentum (kg m/s) |
| z_o | ; Yörünge Merkezi = $\hbar k_y / eB = a_H^2 k_y$ |
| w | ; Açısız Frekans (sn ⁻¹) |
| ω | ; Siklotron Frekansı = (eB/m*) |
| ϵ_o | ; Serbest Uzayın Geçirgenlik Katsayısı = $8,854187817 \cdot 10^{-12}$ C ² /N m ² |
| σ_v | ; Elektron Yoğunluğu = $3 \cdot 10^{22}$ m ⁻³ |
| Γ_{ij} | ; Durulma Zamanı = $1/T_{12}$ (sn ⁻¹) = $1/0.148$ ps ⁻¹ |
| μ | ; Sistemin Geçirgenliği = $4\pi \cdot 10^{-7}$ Hm ⁻¹ |
| ΔE | ; Enerji Düzeyleri Arasındaki Fark |

1. GİRİŞ

Günümüz teknolojisinde yarıiletkenler çok fazla kullanım alanlarına sahiptir ve birçok elektronik cihaz ve düzeneklerin temel yapıtaşını oluşturur. Bu nedenle de hayatımızda oldukça önemli bir yere sahiptirler. Teknolojinin gelişmesine paralel olarak farklı özellik ve işlevlerdeki devre elemanlarının çok küçük hacme sahip olmaları ve hızlı olmaları, yarıiletkenlerin elektronik teknolojisinde tercih edilmesine neden olmaktadır.

Yarıiletkenler, iletkenlik açısından yalıtkanlar ile iletkenler arasında bulunurlar, normalde yalıtkandırlar. Ancak basınç, ısı, ışık, manyetik alan ve elektrik alan altında veya gerilim uyguladığımızda iletkenlik özellikleri artırılabilir ya da içlerine bazı özel maddeler katılarak iletkenlikleri değiştirilebilir. Bu dış etkenler vasıtasıyla, bir elektron, valans bandından iletim bandındaki elektronik enerji seviyelerine geçerse buna; bandlararası (interband) geçiş denir. Eğer geçişler aynı band içerisindeki enerji seviyeleri arasında olursa, bu geçişlere de altbandlararası yada bandiçi (intersubband) geçiş adı verilir [1]. Yarıiletkenler doğada basit element halinde bulunduğu gibi, laboratuvar ortamında bileşik olarak büyütülebilirler. Kristal yapıdadırlar, yani atomları kübik sistem denilen bir düzende sıralanır. Yarıiletkenlere dışarıdan basınç, ısı, ışık, elektrik ve manyetik alan uygulanarak ya da laboratuvar ortamında katılarak büyütülmesi ile iletkenliklerinin yanısıra, elektronik ve optik özellikleri de değiştirilebilir ve birçok optoelektronik aygıt yapımında kullanılabilirler. Örnek olarak; Silisyum (Si) ve germanyum (Ge); diyot, transistör ve entegre devrelerinde, Kükür Sülfür (PbS); güneş pili, fotosel yapımında, Galyum Arsenid (GaAs); tünel diyot, foto-diyot led, lazer yapımında, indiyum fosfür (InP) ise diyot ve transistör yapımında kullanılan yarıiletkenlerden bazılarıdır.

Bu yapıları laboratuvar ortamında oluştururken MOCVD (Metal-Organic-Chemical Vapour Deposition), MBE (Molecular Beam Epitaxy) ve onların çeşitli türleri olan ALE (Atomic Layer Epitaxy), CBE (Chemical Beam Epitaxy) gibi epitaksiyel kristal büyütme teknikleri kullanılmıştır. Örneğin, iki GaAlAs yarıiletken tabakası arasına ince bir GaAs tabakası büyütülerek yapılan tekli kuantum kuyusu, bu tabakaların periyodik olarak tekrarlanması ile çoklu kuantum kuyuları ve tabaka kalınlıklarının ayarlanmasıyla süperörgüler kolayca oluşturulabilmektedir. Büyütülen bu sistemlerde, boyut azaldıkça fiziksel özellikleri belirleyen parametreler

ayarlanabilir hale gelmektedir ve bu sayede istenilen özelliklere sahip devre elemanları yapılabilir.

Bir yarıiletken kuantum kuyusundaki kesikli enerji seviyelerinin varlığı deneysel olarak 1974 yılında Dingle ve ark. tarafından bulunmuştur [2]. Kuantum kuyularında altbandlar arası geçişlerle ilgili daha önceden bazı teorik çalışmalar yapılmış olmakla birlikte böylesi geçişlerin ilk deneysel gözlemi bir GaAs/GaAlAs kuantum kuyusu için West ve Eglash tarafından gerçekleştirilmiştir [3]. Bu deneysel gözlemden sonra farklı sınırlandırıcı potansiyele sahip heteroyapılar için altbandlar arası geçişlerle ilgili hem deneysel hem de teorik birçok çalışma yapılmıştır.[1-9] Altbandlararası (intersubband) geçişlerle ilgili araştırmalar kuantum kuyu kızılötesi fotodetektörü ve kuantum çağlayan lazeri (quantum cascade laser) gibi çeşitli cihazların gelişimine neden olmuştur [4]. Bu tür cihazlar, yüksek hız ve verimliliğin yanı sıra boyutsal olarak da küçük olduklarından uygulamada oldukça avantajlıdırlar.

Yarıiletken heteroyapıların kristal büyütme teknikleri kullanılarak büyütülmesiyle elektron gazının iki boyutta incelenmesi sağlanmıştır. Böylece üç boyutlu doğada gerçekleşen olaylar daha basit denklemlerle iki boyutta çözülerek meydana gelecek olayları tanımlamak mümkündür. Bir yarıiletken heteroyapıya elektrik alan uygulanmasıyla kesikli altbandlar oluşur. Manyetik alanın yüzeylere dik olarak uygulanması her altbandın Landau düzeylerine yarılmaya neden olur ve böylece tamamen kuantize bir sistem oluşur. Bu durumda manyetik alan ile kuşatmayı oluşturan elektrik alanın yönleri aynıdır. Sistemi tanımlayan Hamiltoniyen, Landau düzeylerine neden olan manyetik parça ve altbandları oluşturan elektrik parçası olmak üzere iki parçadan oluşur. Böylece sistemin çözümü olan enerji özdeğerleri kolaylıkla bulunur. [5,6,7]

Manyetik alanın heteroyapının büyütme doğrultusuna dik uygulanması durumunda analitik çözümler yapılabilir ancak elektron gazı üzerinde bir kuşatma etkisi oluşturmadığı için enerji spektrumunda fazla bir değişiklik gözlenmez, sadece altbandlar arası geçişlerde etkilidir [5]. Tek kuantum kuyusundaki bir elektronun enerji spektrumu ile ilgili yapılan çalışmalar, kuantum aygıtlarındaki geçişleri anlamamızın temelini oluşturur. [5, 8,9].

Eğik manyetik alan altındaki kuantum kuyusunda Schrödinger denkleminin tam analitik çözümü İ. Sökmen'in 1995 yılında matematiksel dönüşümler kullanarak yaptığı çalışma ile doldurulmuştur. İ. Sökmen ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışmada analitik bir çözüm tekniği ile eğik manyetik alan altında tek kuantum kuyusunu

tanımlayan Schrödinger denkleminin enerji özdeğerlerinin, yörünge merkezine göre değişimleri incelenmiştir [10].

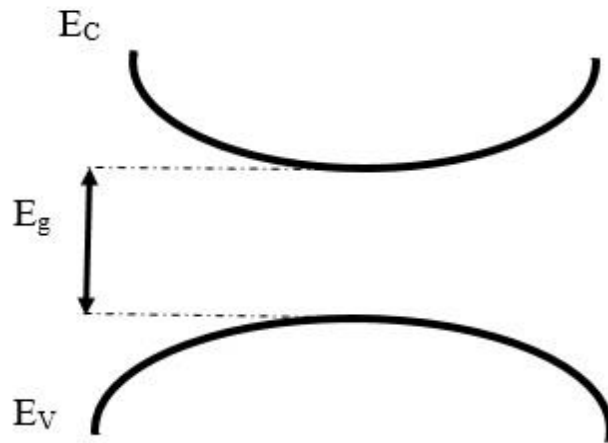
Bu çalışmada üç kuantum kuyusundan oluşan $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$ yarıiletken heteroyapıya, büyütmeye doğrultusunda (z) elektrik alan ve x eksenine ile θ açısı yapacak şekilde eğik manyetik alan uygulanarak sistemin enerji özdeğerleri ve dalga fonksiyonları, etkin kütle yaklaşımı kullanılarak hesaplanmıştır. Üç kuantum kuyusundan oluşan sistemin ilk altı elektronik enerji düzeylerinin yörünge merkezine göre değişim grafikleri elektrik alanın farklı değerleri için çizilerek yorumlanmıştır. İkinci aşamada; elektrik alan, eğik manyetik alan ve kuyu parametrelerinin farklı değerlerinde, yapının 1-2, 2-3 ve 1-3 bandı için lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indislerinin gelen foton enerjisinin fonksiyonu olarak grafikleri çizilerek yorumlanmıştır. Üç kuantum kuyusundan oluşan $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$ heteroyapının optik özelliklerinin, kuyu parametrelerine, uygulanan dış alan şiddetlerine ve uygulanma doğrultularına duyarlı olduğu anlaşılmıştır.

2. DÜŞÜK BOYUTLU YAPILAR

Düşük boyutlu yapılar, kuantum kuyuları (quantum well), kuantum telleri (quantum wire) ve kuantum noktaları (quantum dot) olarak adlandırılır. Bu yapılar değişik yarıiletkenlerin (*GaAs*, *GaAlAs*, *InP*, *Ge*, *Si* vb) kullanılması sonucu elektronun hareket serbestliğinin kısıtlanmasıyla elde edilir.

Yarıiletken malzemeler kullanılarak bu yapıların üretilmesindeki en büyük etkenlerden birisi taşıyıcı olarak nitelendirilen elektronlar veya boşlukların kolaylıkla kontrol edilebilmesidir. Düşük boyutlu yapılar, yarıiletkenleri oluştururken bir alt tabaka (substrate) üzerinde atomik tabakalar kalınlığında epitaksiyel olarak büyütülerek oluşturulur. Ayrıca iletimi sağlayan taşıyıcı yoğunluklarının katkılama ile belirlenebilmesi de yarıiletken malzemelerin kullanılmasındaki büyük etkenlerden biridir. Örneğin; katkılayarak bileşik halde bulunan *GaAs*, *GaAlAs* *InAs* vb. gibi yarıiletkenler yapabiliriz.

Düşük boyutlu kuantum yapılar farklı yarıiletken tabakaların bir araya getirilmesi sonucunda oluşturulur. Bu yarıiletken tabakaların E_c (iletim bandı) ve E_v (valans bandı) bandları arasında potansiyel fark oluşur. Bu potansiyel farka E_g (yasak band aralığı) denir. Oluşan bu potansiyel fark taşıyıcıların sınırlandırılmasına neden olur. Bu sınırlandırılmış taşıyıcıların bulunduğu tabaka genişliği elektronun de Broglie dalga boyu (λ) mertebesinde olduğu için kuantum etkiler gözükür.



Şekil 2. 1 Yarı iletken bir malzemenin band yapısı

Eğer serbestlik derecesi sayısı D_f , sınırlama doğrultularının sayısı D_c ile gösterilirse, bu durumda tüm katihal sistemleri için $D_f + D_c = 3$ şeklinde verilir [11]. Düşük boyutlu yapıların serbestlik derecesi ve sınırlama doğrultularının sayılarını şu şekilde ifade edebiliriz.

| Yapılar | D_c | D_f |
|-------------------------|-------|-------|
| Hacimsel (Bulk) | 0 | 3 |
| Kuantum Kuyuları (Well) | 1 | 2 |
| Kuantum Telleri (Wire) | 2 | 1 |
| Kuantum Noktaları (Dot) | 3 | 0 |

Çizelge 2.1 Düşük boyutlu yapıların serbestlik derecesi ve sınırlama doğrultu sayıları

Bulk malzemelerde taşıyıcıların hareketi üç boyutta serbest iken kuantum kuyularında iki boyutta, kuantum tellerinde bir boyutta ve kuantum noktalarında sıfır boyutta olur. Düşük boyutlu kuantum yapılar taşıyıcı hareketindeki serbestlik derecesi sayısına göre isimlendirildiğinden bulk (hacimsel) üç boyutlu (3D), kuantum kuyuları iki boyutlu (2D), kuantum telleri (1D), kuantum noktaları ise sıfır boyutlu (0D) yapı olarak adlandırılır.

İki boyutlu sistemlerin elektronik açıdan bir başka ilginç özelliği de, yük taşıyıcılarının yaşam süreleri ile yoğunluklarının değiştirilebilir olmasıdır. Düşük boyutlu sistemler üzerinde ilk çalışma, Esaki ve Tsu tarafından yapılmıştır [12].

3. HETEROYAPILAR

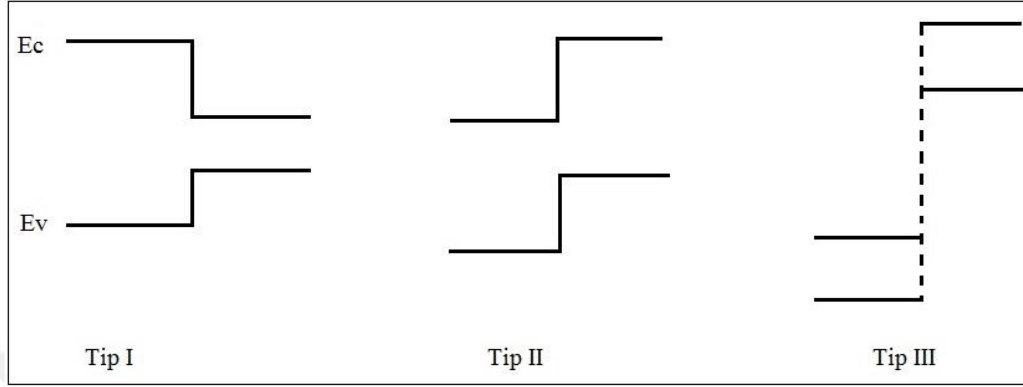
Yarıiletkenlerin elektronik ve optik özellikleri amaca uygun şekilde değiştirilebilen bant yapısına bağlıdır. Bu bağlamda metal organik kimyasal buhar biriktirme (MOCVD) ve moleküler ışın epitaksi (MBE) yöntemleri kullanılarak farklı elektronik özelliklere sahip yarıiletken malzemelerin büyütülmesi mümkündür [13]. Bu şekilde oluşturulan farklı iki yarıiletkenin bir araya getirilmesi ile oluşan yapıya heteroyapı denir. Bu yapılar; geniş bant aralığına sahip yarıiletken malzeme üzerine, dar bant aralığına sahip yarıiletken malzemenin büyütülmesiyle iletkenlik ve valans bantlarındaki taşıyıcılar için potansiyel kuyusu oluşturur. Ayrıca bu iki yarıiletken arasındaki ara yüzeye de heteroeklem denilmektedir. Heteroeklemler, heteroyapıların elektronik özelliklerinin belirlenmesinde önemli rol oynarlar ve heteroyapılar ile istenilen elektronik ve optik özelliklere sahip cihazların tasarlanması mümkündür [14]. İki yarıiletkenin heteroyapı oluşturabilmesi için bir araya getirilen yarıiletkenlerin örgü sabiti ve örgü yapısı birbirine yakın olmalıdır [15, 16]. Örneğin GaAlAs, içerisinde barındırdığı AlAs ve GaAs yüzdelere bağlı olarak bant aralığı ayarlanabilir [13]. $Ga_{1-x}Al_xAs$ alaşım sisteminde, Al konsantrasyonu $0 \leq x \leq 0.45$ aralığında kullanıldığında GaAs ile neredeyse mükemmel bir uyum sağladığından çok yüksek kaliteli heteroyapılar oluşturulabilmektedirler [16, 17].

Bant aralığının yanı sıra, heteroyapılar için ara yüzeydeki iletim ve değerlik bandı enerji pozisyonları da önemlidir. Bant aralığı iletim ve değerlik bandındaki bant süreksizliğini (band offset) kontrol eder. İki yarıiletkenin ara yüzeyi arasında bant kenarındaki süreksizliğe “band süreksizliği” denilmektedir. Şekil 3.1’de yarıiletken heteroyapılarda oluşan üç farklı tipteki band süreksizliği gösterilmiştir. Bunlar I-tip (normal), II-tip (Katlı) ve III-tip (Kırık Kayma) heteroyapılar olarak adlandırılmaktadırlar.

Tip I band süreksizliğinde şekil 3.1’de görüldüğü gibi iki yarıiletken malzemenin bant boşlukları farklıdır. Küçük bant boşluğuna sahip olan yarıiletken, büyük bant aralığına sahip olan yarıiletkenin bant aralığı içerisinde yer almaktadır. GaAs ve AlAs Tip I’e iyi bir örnektir.

Tip II band süreksizliğinde, ikinci yarıiletkenin bant boşluğunun sadece bir kısmı, birinci yarıiletkenin bant aralığı içerisinde yer alır. İki yarıiletkenin enerji değerlerinin üst üste geldiği görülür. Bu tip bant hizalama GaSb/GaAs sistemleri için önemli bir karakteristiktir.

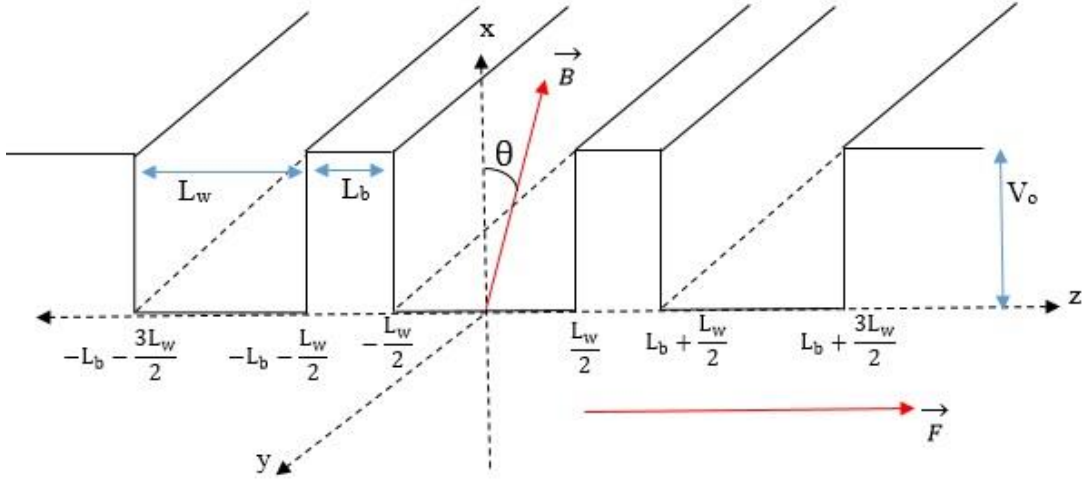
Tip-III band süreksizliğinde ise iki malzeme arasında aralık bırakılır. Bundan dolayı iki yarıiletkenin enerji değerlerinin üst üste gelmediği görülmektedir [13].



Şekil 3. 1 İki farklı yarı iletkenin oluşturduğu heteroyapılardaki bant süreksizliği tipleri.

Bir yarıiletkenin boyutları, taşıyıcıların aldığı ortalama serbest yollar ya da de-Broglie dalga boyu ile kıyaslanabilir mertebelerde olduğu zaman, kuantum boyut etkileri görülür. Külçe yapılarda bu değer yaklaşık 300 Å mertebesinde olduğu için kuantum boyut etkisi ortaya çıkmaz. İki farklı band aralığına sahip yarıiletken atomik tabakalar halinde büyütülürse ve dar band aralığına sahip olan yarıiletken tabakası yeterince inceyse, yarıiletken ara yüzeyine dik doğrultuda yani yarıiletkenin büyütme doğrultusunda taşıyıcıların hareketleri kuantize olur. Taşıyıcılar x ve y doğrultularında serbest hareket ederken, büyütme doğrultusunda enerji spektrumları kesikli değerler alır. Bu olay kuantum boyut etkisinin sonucudur [18] ve bu sistemler iki boyutlu sistemler adını alır.

4. ÜÇ KUANTUM KUYUSUNDAN OLUŞAN $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$ HETEROYAPIDA ELEKTRİK VE MANYETİK ALAN ETKİSİ



Şekil 4. 1 Üçlü kuantum kuyusu

Bu çalışmada iki $Ga_{1-x}Al_xAs$ arasına bir $GaAs$ eklenerek oluşturulan yarıiletken heteroyapıdaki üç kuantum kuyusundan oluşan sistemin üzerinde çalışıldı. Literatürde de sıkça çalışılan bu yapının tercih edilmesinin sebebi $Ga_{1-x}Al_xAs$ ile $GaAs$ yarıiletkenlerinin birbirine çok yakın örgü sabitlerine sahip olmasıdır. Şekil 4.1 de gösterilen üç kuantum kuyusundan oluşan sistemin kuyu genişliği L_w , bariyer genişliği L_b ve potansiyel yükseklik ise V_0 'dır. Şekilde görüldüğü gibi x eksenine θ açısı yapacak şekilde bir manyetik alan ve büyüme doğrultusunda (z) bir elektrik alan uygulanmıştır.

Birçok farklı uygulamada çoklu kuantum kuyuları kullanıldığı halde son zamanlarda en yaygın kullanım alanlarından birisi kuantum çağlayan lazer (QCL) olmuştur [19]. Çoklu kuantum kuyuları kullanılarak yapılan lazerler, tekli kuantum kuyularına oranla daha yüksek verim sağlar [20].

Kuantum kuyusuna eğik bir manyetik alan uygulandığında, sistemi tanımlayan Hamiltoniyen bileşenlerine ayrılabilir hale getirilemediğinden analitik çözümleri yapılamamaktadır. Bu yüzden literatürde parabolik [8, 9 21-24] ve üçgen tipi [25] gibi bir takım farklı potansiyel tipleri kullanılmış ve analitik çözümler yapılabilmektedir. Ayrıca birçok bilim adamı da pertürbatif ve varyasyonel yaklaşımlarla bu problemleri çözmüştür [5,26].

Eğik manyetik alan altındaki kuantum kuyusunda Schrödinger denkleminin tam analitik çözümü 1995 yılında bir dizi matematiksel dönüşümler kullanarak yapılan çalışma ile doldurulmuştur [10].

Optik cihaz yapımında kullanılan yarıiletkenlerdeki taşıyıcıların enerji bandları arasındaki geçişleri önemlidir. Bu geçişlere ışığın soğurulması veya salınması neden olur. Değerlik bandındaki elektronun iletkenlik bandına geçmesi durumu banddan banda geçiş olarak isimlendirilir. Bir yarıiletkene ışık uygulandığında birçok geçiş mümkündür; band içi geçiş, bandlararası geçiş ve bandlarla katkı düzeyleri arasındaki geçiş sayılabilir.

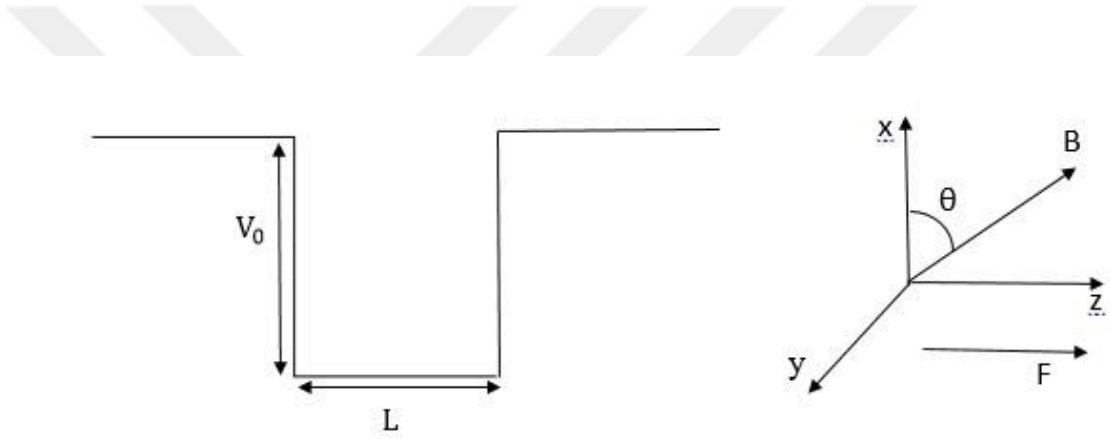
Hem kuantum kuyularında hem de süperörgülerde altbandlararası geçiş çalışmaları, kızıl ötesi fotodetektörlerde görülen son yıllardaki gelişmelerle hız kazanmıştır. Kuantum kuyu kızılötesi fotodetektörü ve kuantum çağlayan lazeri gibi çeşitli cihazlarla ilgili çalışmalar Mosely ve arkadaşları tarafından yapılmıştır [27]. Kızılötesi lazerler [21, 28, 6-8] ve modülatörler [27, 29] gibi optoelektronik aygıtlar tasarlanırken de altbandlar arasındaki geçişlerden yararlanılmıştır. Bu alandaki çalışmalarda çoğunlukla kare kuantum sistemi üzerinde durulmasına rağmen asimetric bir kuantum sisteminin simetric kuantum sistemi karşısında daha avantajlı olduğu ifade edilmiştir [30]. Simetric kuantum sisteminde dipol matris elemanı olmadığı için $1 \rightarrow 3$ ve $2 \rightarrow 4$ gibi geçişler izinli değildir. Çünkü enerji düzeylerinin zarf dalga fonksiyonları aynı paritelidir. Bu durumun elektrik alan uygulanarak [27] ya da adım tipi kuantum sistemi[30] kullanarak izinli hale getirilebilir. Y.J. Mii ve arkadaşları adım tipi kuantum sistemi kullanarak $1 \rightarrow 2$ ve $1 \rightarrow 3$ geçişleri için büyük osilatör şiddetleri bulmuştur [5, 31]. Böylece asimetric kuantum sistemleri için, normalde yasaklı olan geçişler izinli geçiş haline gelir.

4.1 Teori

Kuyu genişliği L , potansiyel yüksekliği V_0 olan kuantum kuyusu sistemine x - z düzleminde eğik manyetik alan $\vec{B} = (B\cos\theta, 0, B\sin\theta)$ ve z doğrultusuna (büyütme doğrultusuna) paralel olarak elektrik alan uyguladığımızda Coulomb ayarı ($\vec{\nabla} \cdot \vec{A} = 0$) kullanılarak manyetik alan vektör potansiyeli

$$\vec{A} = (0, xB\sin\theta - zB\cos\theta, 0) \quad [4.1]$$

şeklinde tanımlanabilir. Burada, θ açısı x doğrultusu ile B manyetik alan uygulama doğrultusu arasındaki açıdır.



Şekil 4. 2 Tek kuantum kuyusu.

Manyetik alan uygulanan bir üçlü kuantum kuyusu için SI birim sistemindeki hamiltoniyeni şu şekilde ifade edilir;

$$H = \frac{1}{2m^*} (\vec{p} + e\vec{A})^2 + V(z) \quad [4.2]$$

Burada; m^* elektron etkin kütlesi, $V(z)$ ise z doğrultusundaki elektrik alan katkısı görülen kuyudaki elektronun potansiyel enerjisidir. $V(z)$, S basamak fonksiyonu kullanılarak N kuantum kuyusundan oluşan sistem için şu şekilde tanımlanır [5].

$$V(z) = V_0 \sum_{i=1}^N [S(z_{L_i} - z) + S(z - z_{R_i}) - (N - 1)] - eFz \quad [4.3]$$

Burada; $z = z_{L_i}$ ve $z = z_{R_i}$ kuantum kuyusunun sırasıyla sol ve sağ sınırlarıdır. Kuşatılan elektron y yönünde serbest hareket eder. Sistemin dalga fonksiyonu

$\psi(\vec{r}) = e^{ik_y y} \varphi(x, z)$ şekilde yazılır. Hamiltoniyen denklem [4.2]'ye, vektör potansiyeli \vec{A} (denklem [4.1]) uygulandığı zaman;

$$H = \frac{1}{2m^*} (p_x^2 + p_z^2) + \frac{1}{2m^*} [\hbar k_y - eB(z \cos\theta - x \sin\theta)]^2 + V(z) \quad [4.4]$$

hamiltoniyeni elde edilir. Bu denklemi çözebilmek için y eksenini etrafında θ kadar döndürülerek x' eksenini ile B manyetik alan paralel hale getirilir. Nokta kanonik dönüşümü kullanarak;

$$\begin{pmatrix} z' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z \\ x \end{pmatrix} \quad [4.5]$$

ve yeni tanımlanan (x', z') koordinatları cinsinden hamiltoniyen;

$$H = \frac{(p_{x'}^2 + p_{z'}^2)}{2m^*} + \frac{1}{2} m^* \omega^2 (z'_0 - z')^2 + V(x', z') \quad [4.6]$$

şeklinde elde ederiz. Burada $\omega = eB/m^*$ siklotron frekansı, $a_H = (\hbar/m^* \omega)^{1/2}$ manyetik uzunluk, $z'_0 = \hbar k_y / eB = a_H^2 k_y$ yörünge merkezidir. Koordinat dönüşümünden sonra hamiltoniyende [4.6], $V(x', z')$ terimlerini ayrılabilir hale getirmek için dönüşüm, basamak fonksiyonuna uygulandığında basamak fonksiyonunun yeni durumu aşağıdaki gibi olur.

$$\begin{aligned} S(z_{L_i} - z) &= \cos^2\theta S(z'_{L_i} - z') + \sin^2\theta S(x'_{L_i} - x') \\ S(z - z_{R_i}) &= \cos^2\theta S(z' - z'_{R_i}) + \sin^2\theta S(x' - x'_{R_i}) \end{aligned} \quad [4.7]$$

Böylece iki bileşeni içeren $V(x', z')$ potansiyeli şu şekilde ayrılabiliriz.

$$V(x', z') = V(x') + V(z') \quad [4.8]$$

Buradaki $V(x')$ ve $V(z')$ ifadelerini ayrıntılı olarak yazarsak;

$$\begin{aligned} V(x') &= V_0 \sin^2\theta \sum_{i=1}^N [S(x'_{L_i} - x') + S(x' - x'_{R_i}) - (N-1)] + eF \sin\theta x' \\ V(z') &= V_0 \cos^2\theta \sum_{i=1}^N [S(z'_{L_i} - z') + S(z' - z'_{R_i}) - (N-1)] + eF \cos\theta z' \end{aligned} \quad [4.9]$$

Böylece sistemin hamiltoniyeni aşağıdaki gibi bileşenlerine ayrılır;

$$H = H_{x'} + H_{z'} \quad [4.10]$$

Bu bileşenlerin açıkça ifadesi;

$$H_{x'} = \frac{p_{x'}^2}{2m^*} + V(x')$$

$$H_{z'} = \frac{p_{z'}^2}{2m^*} + \frac{1}{2}m^*\omega^2(z'_0 - z')^2 + V(z') \quad [4.11]$$

şeklinindedir. Tek boyutlu Schrödinger denklemleri şu şekildedir.

$$H_{x'} \chi(x') = E_{x'} \chi(x') \quad [4.12]$$

$$H_{z'} \phi(z') = E_{z'} \phi(z') \quad [4.13]$$

$H_{x'}$ hamiltoniyeni etkin yüksekliği $V_{eff} = V_0 \sin^2 \theta$ ve etkin genişliği $L_{eff} = L \sin \theta$ olan tek boyutlu çoklu kuantum kuyusunu tanımlarken, $H_{z'}$ hamiltoniyeni etkin yüksekliği $V_{eff} = V_0 \cos^2 \theta$ ve etkin genişliği $L_{eff} = L \cos \theta$ olan kuantum kuyusunu tanımlar. $H_{x'}$ hamiltoniyeni k_y 'den bağımsızdır. $H_{z'}$ hamiltoniyeni

$z'_0 = \hbar k_y / eB = a_H^2 k_y$ yörünge merkezi tanımındaki k_y 'e bağlıdır. Sistemin dalga fonksiyonu şu şekildedir.

$$\psi(\vec{r}) = e^{ik_y y'} \chi(x') \phi(z') \quad [4.14]$$

Toplam enerji özdeğerleri;

$$E = E_{x'} + E_{y'} + E_{z'} \quad [4.15]$$

şeklinde yazılır. Burada x' doğrultusundaki Schrödinger denkleminin çözümleri Airy fonksiyonları (Airy Ai ve Airy Bi) olan Wannier-Stark lokalizasyonu problemidir.

Toplam enerjiye x' ve y' doğrultularından gelen katkı, literatürde çözümleri bilindiği ve sıklıkla çalışılmış olduğu için $H_{z'}$ hamiltoniyen çözümlerini bulmaya çalışacağız.

Denklem [4.13]'de verilen özdeğer denklemini boyutsuz olarak ifade edebilmek için;

$$u = z'_0 - z' \quad [4.16]$$

dönüşümünü yaparak;

$$\tilde{u} = (\sqrt{2}/a_H)u, \quad \tilde{E}_{z'} = E_{z'}/\hbar\omega, \quad \text{ve} \quad \tilde{V}_0 = V_0/\hbar\omega \quad [4.17]$$

boyutsuz parametreleri kullanarak z' doğrultusundaki Schrödinger denklemi elde edilir;

$$\frac{d^2 \phi(\tilde{u})}{d\tilde{u}^2} + \left(-\frac{1}{4} \tilde{u}^2 - \tilde{V}_0 \cos^2 \theta S[\tilde{u}] + \tilde{E}_{z'} + \tilde{\alpha}_o - \tilde{\beta} \tilde{u} \right) \phi(\tilde{u}) = 0 \quad [4.18]$$

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}_o &= \frac{eF a_H}{\sqrt{2} \hbar \omega} \cos \theta \tilde{z}_o \\ \tilde{\beta} &= \frac{eF a_H}{\sqrt{2} \hbar \omega} \cos \theta \end{aligned} \quad [4.19]$$

Burada $S[\tilde{u}]$, dönüşümü sonucu basamak fonksiyonu aşağıdaki halini alır;

$$S[\tilde{u}] = \sum_i \{ S(\tilde{u} - \tilde{u}_{L_i}) + S(\tilde{u}_{R_i} - \tilde{u}) - (N - 1) \} \quad [4.20]$$

\tilde{u} koordinatı $2\tilde{\beta}$ kadar kaydırıldığında $\tilde{\zeta} = \tilde{u} + 2\tilde{\beta}$ bu yeni koordinatlar cinsinden [18]'deki Schrödinger denklemi yeniden yazılır.

$$\frac{d^2 \phi(\tilde{\zeta})}{d\tilde{\zeta}^2} + \left[\left(m + \frac{1}{2} \right) - \frac{1}{4} \tilde{\zeta}^2 \right] \phi(\tilde{\zeta}) = 0 \quad [4.21]$$

Böylece; denklem [4.13] özdeğer denklemi, yapılan dönüşüm ve hesaplamalarla denklem [4.21]'deki çözümleri iyi bilinen diferansiyel denklemlere dönüştürülür. Bahsedilen çözüm,

$$D_m(\tilde{\zeta}) = 2^{m/2} e^{-\tilde{\zeta}^2/4} \left[\frac{\sqrt{\pi}}{\Gamma(1/2 - m/2)} F\left(\frac{-m}{2} \middle| \frac{1}{2} \middle| \frac{1}{2} \tilde{\zeta}^2\right) - \frac{\sqrt{2\pi\tilde{\zeta}}}{\Gamma(-m/2)} F\left(\frac{(1-m)}{2} \middle| \frac{3}{2} \middle| \frac{1}{2} \tilde{\zeta}^2\right) \right] \quad [4.22]$$

[4.22] denkleminde açık şekilde gösterilen Weber fonksiyonlarıdır [28]. Burada $\Gamma(x)$ Gamma fonksiyonu, $F(a|b|x)$ Confluent Hipergeometrik fonksiyonlardır. Kuantum kuyularının hem bariyer ve hemde kuyu bölgeleri için çözümü yapılır. Daha sonra sınır şartları göz önünde bulundurularak katsayılar determinantı sıfıra eşitlenir. Böylece hamiltoniyenin z' doğrultusundaki boyutsuz enerji özdeğerleri bulunur. Burada m ve m' sırasıyla kuyu ve bariyer bölgesi için kuantum sayılarıdır. m ve m' parametreleri ile özdeğerler arasındaki bağlantı;

$$\tilde{E}_{z'} = m + \frac{1}{2} + \tilde{\beta}^2 - \tilde{\alpha}_o \quad \text{ve} \quad \tilde{E}_{z'} - \tilde{V}_0 \cos^2 \theta = m' + \frac{1}{2} + \tilde{\beta}^2 - \tilde{\alpha}_o \quad [4.23]$$

şeklindedir. Boyutsuz m ve m' , potansiyel yüksekliği \tilde{V}_0 'a;

$$(m - m') = \tilde{V}_0 \cos^2 \theta \quad [4.24]$$

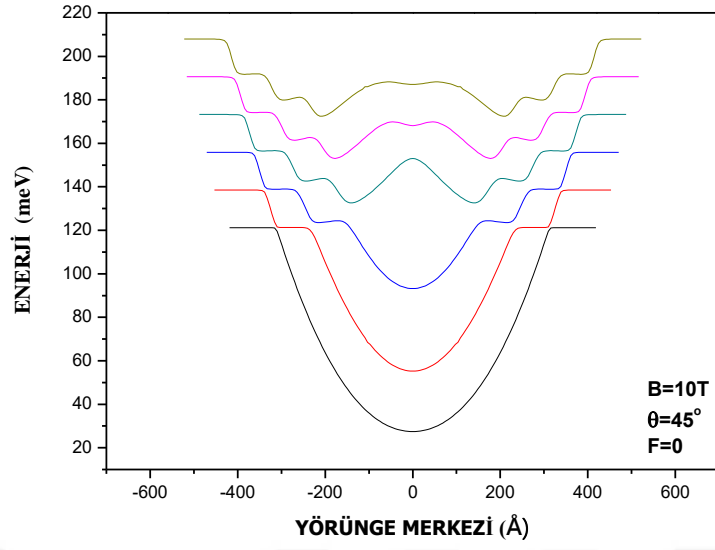
şeklinde bağlıdır.

4.2. Veriler Ve Yorumlar

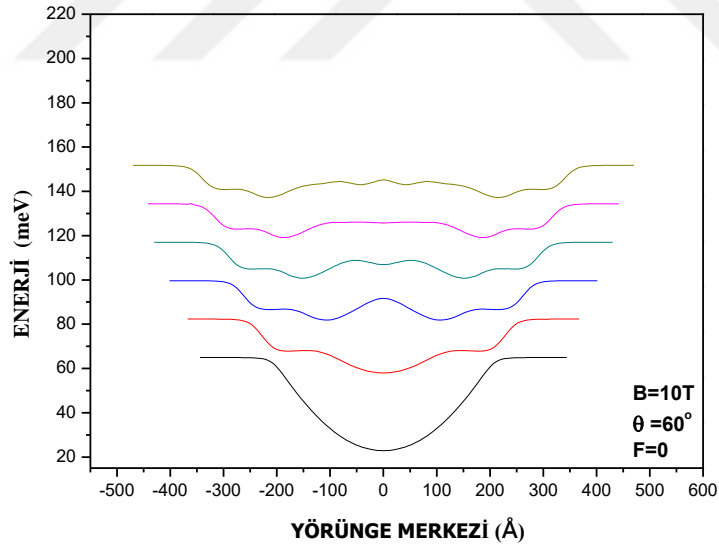
Bölüm 4.1'de z' doğrultusunda boyutsuz parametreler cinsinden elde ettiğimiz Schrödinger denkleminin (denklem [17]) enerji özdeğerleri, bilgisayarda mathematica programı kullanarak bulundu ve OriginPro 8 programında özdeğerlerin yörünge merkezine göre değişimi çizildi. Üç kuyudan oluşan sistemde elektrik alanın sıfır veya $F=50 \text{ kV/cm}$ değerleri için farklı θ açısı ($\theta=45^\circ$, $\theta=60^\circ$, $\theta=75^\circ$), farklı manyetik alan ($B=10\text{T}$, $B=15\text{T}$, $B=20\text{T}$) değerlerine göre elektronik enerji spektrumu grafikleri çizildi. GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs heteroyapı için enerji özdeğerlerinin manyetik alan, uygulama açısı ve elektrik alanın farklı değerlerine göre değişimleri araştırıldı. Bu hesaplamalarda potansiyel yükseklik $V_0 = 225 \text{ meV}$, kuyu genişliği $L_w = 80\text{Å}$ ve bariyer genişliği $L_b = 15\text{Å}$ olarak alınmıştır.

| Vo=225 | | Lw=80 | | | Lbar=15 | | | Vo=225 | | | Lw=80 | | | Lbar=15 | | |
|----------------------|----------|--------------------------|----------|----------------------|---------------|--------------------------|----------|----------------------|---------|-------------------------|---------------|----------------------|---------|-------------------------|----------|--|
| | | B=10 T | | | B=15 T | | | | | | B=20 T | | | | | |
| Açı | 45 | 60 | 75 | Açı | 45 | 60 | 75 | Açı | 45 | 60 | 75 | Açı | 45 | 60 | 75 | |
| 1. | 1,081 | 0,817 | 0,483 | 1. | 0,672 | 0,475 | 0,284 | 1. | 0,49 | 0,32 | 0,2 | 1. | 0,49 | 0,32 | 0,2 | |
| 2. | 2,683 | 2,84 | 1,82 | 2. | 1,915 | 2,002 | 1,524 | 2. | 1,6 | 1,63 | 1,38 | 2. | 1,6 | 1,63 | 1,38 | |
| 3. | 4,87 | 4,78 | 2,747 | 3. | 3,404 | 3,683 | 2,492 | 3. | 2,76 | 3,12 | 2,37 | 3. | 2,76 | 3,12 | 2,37 | |
| 4. | 8,316 | 5,663 | 3,808 | 4. | 6,087 | 4,742 | 3,516 | 4. | 4,96 | 4,3 | 3,38 | 4. | 4,96 | 4,3 | 3,38 | |
| 5. | 9,189 | 6,745 | 4,795 | 5. | 7,268 | 5,664 | 4,529 | 5. | 6,28 | 5,17 | 4,4 | 5. | 6,28 | 5,17 | 4,4 | |
| 6. | 10,279 | 7,862 | 5,805 | 6. | 8,249 | 6,891 | 5,518 | 6. | 7,34 | 6,38 | 5,38 | 6. | 7,34 | 6,38 | 5,38 | |
| Potansiyel Yükseklik | 6,48175 | 3,24087 | 0,86839 | Potansiyel Yükseklik | 4,32116 | 2,16058 | 0,578926 | Potansiyel Yükseklik | 3,24087 | 1,62044 | 0,434195 | Potansiyel Yükseklik | 3,24087 | 1,62044 | 0,434195 | |
| Manyetik Uzunluk | | 8,11306x10 ⁻⁹ | | Manyetik Uzunluk | | 6,62429x10 ⁻⁹ | | Manyetik Uzunluk | | 5,7368x10 ⁻⁹ | | Manyetik Uzunluk | | 5,7368x10 ⁻⁹ | | |
| Kuyu Genişliği | 0,986064 | 0,697253 | 0,360925 | Kuyu Genişliği | 1,20768 | 0,853957 | 0,44204 | Kuyu Genişliği | 1,39451 | 0,986064 | 0,510424 | Kuyu Genişliği | 1,39451 | 0,986064 | 0,510424 | |
| Kuyunun Ortası | 1,66398 | 1,17661 | 0,60906 | Kuyunun Ortası | 2,03795 | 1,44105 | 0,745943 | Kuyunun Ortası | 2,35323 | 1,66398 | 0,861341 | Kuyunun Ortası | 2,35323 | 1,66398 | 0,861341 | |

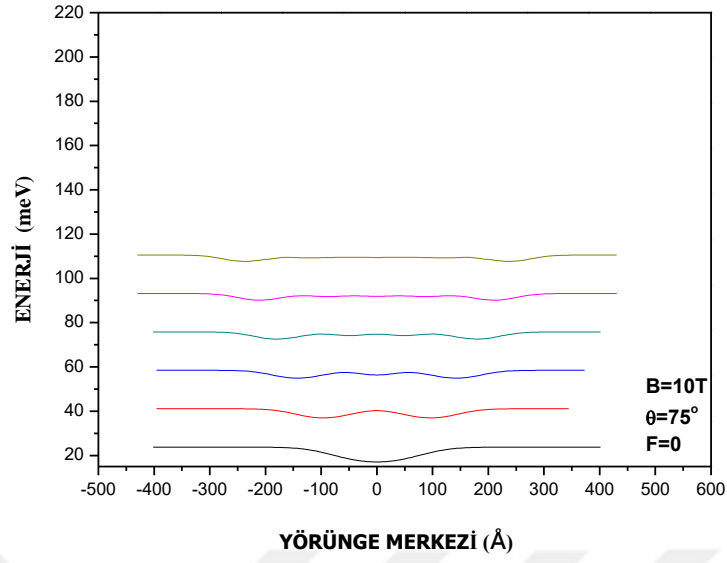
Çizelge 4.1 Manyetik alanın 10T, 15T, 20T ve θ' 'nin 45°, 60°, 75° değerleri için ilk altı boyutsuz enerji düzeyi değerleri.



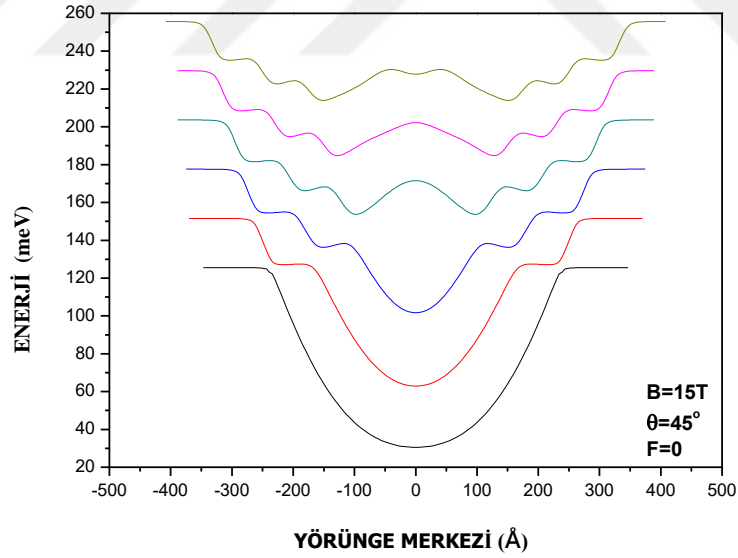
Şekil 4. 3 $B = 10T$, $\theta=45^\circ$, $F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



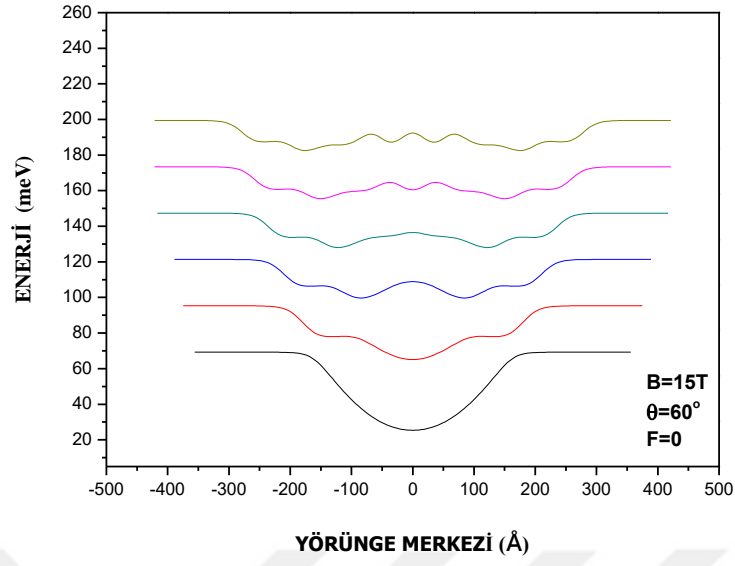
Şekil 4. 4 $B = 10T$, $\theta=60^\circ$, $F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



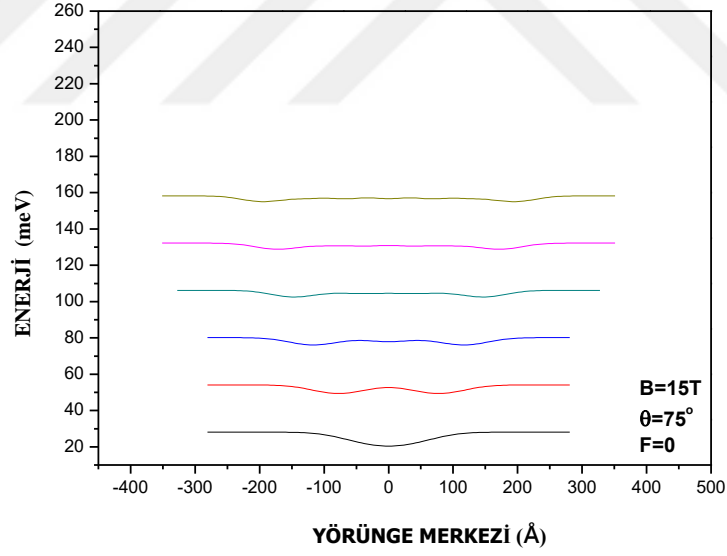
Şekil 4. 5 $B = 10\text{T}$, $\theta=75^\circ$, $F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



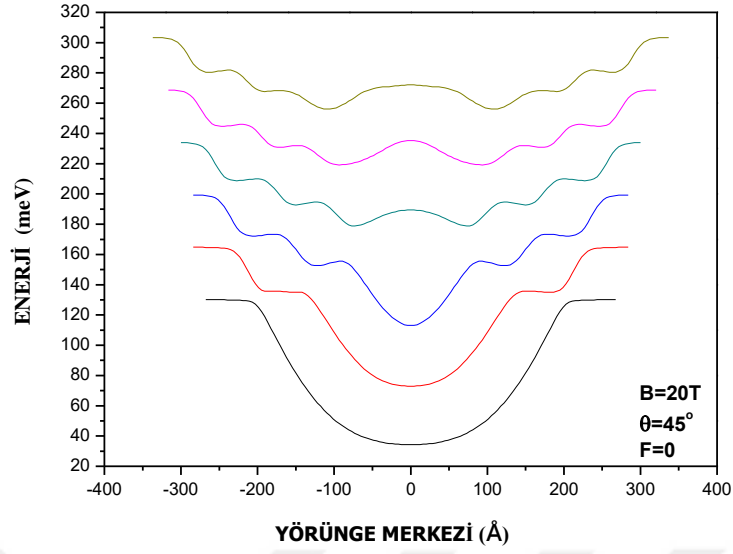
Şekil 4. 6 $B = 15\text{T}$, $\theta=45^\circ$, $F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



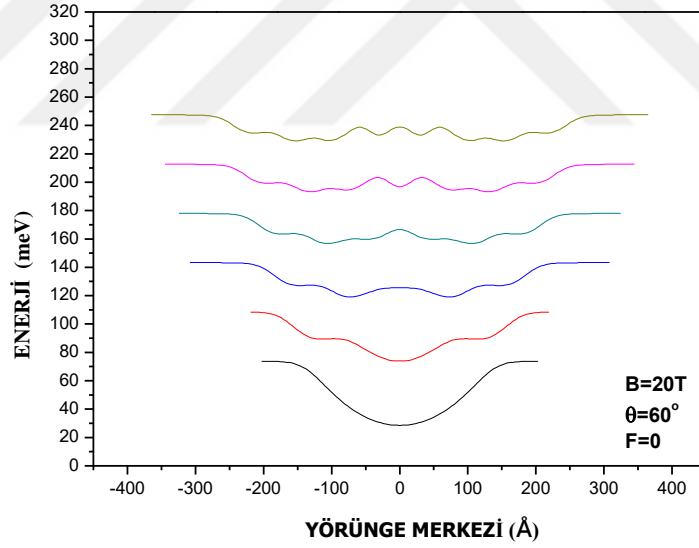
Şekil 4. 7 $B = 15\text{T}$, $\theta=60^\circ$, $F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



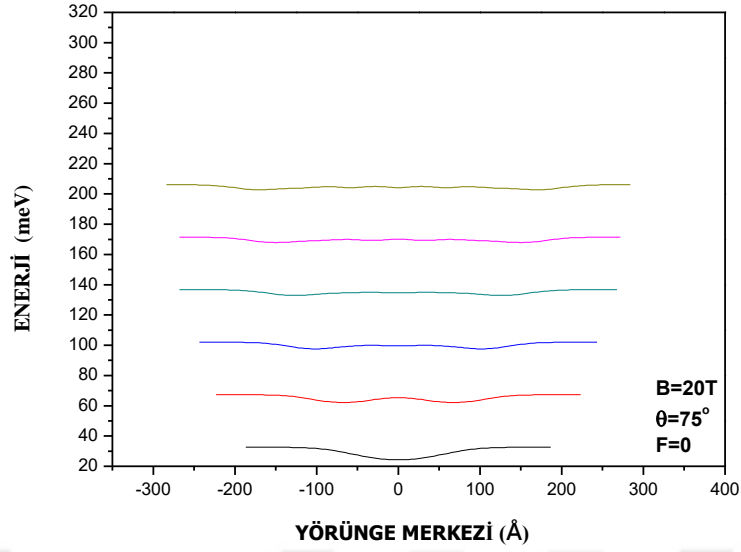
Şekil 4. 8 $B = 15\text{T}$, $\theta=75^\circ$, $F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



Şekil 4. 9 $B = 20T$, $\theta=45^\circ$, $F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



Şekil 4. 10 $B = 20T$, $\theta=60^\circ$, $F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



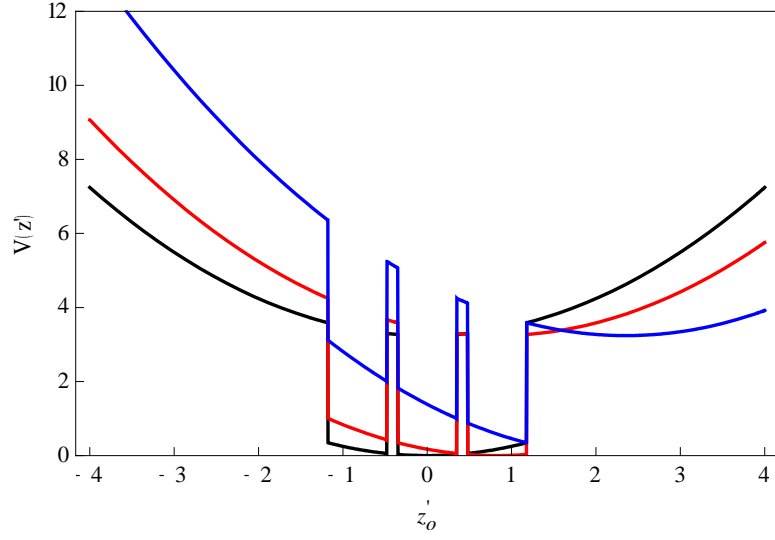
Şekil 4. 11 $B = 20T$, $\theta=75^\circ$, $F=0$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.

Şekil 4.3 – Şekil 4.11’de üç kuyudan oluşan kuantum sisteminde manyetik alanın x' eksenine ile yapmış olduğu farklı θ açısı ile hesaplanmış olduğumuz ilk altı E'_z enerji düzeylerinin yörünge merkezine göre değişimleri çizilmiştir. Bu sistemde potansiyel yükseklikten küçük olan enerji düzeylerinin kuyu içerisinde lokalize olduğu görülürken potansiyel yükseklikten büyük olan enerji düzeylerinin uzaysal kuşatmanın etkin olduğu kuyu bölgesinin dışında manyetik kuşatmanın etkisi altında parabolik kuşatma bölgesinde olduğu görülmektedir. Burada iki farklı durum olduğu anlaşılmaktadır. Manyetik alanın neden olduğu parabolik potansiyel etki nedeni ile kuyu sistemindeki enerji düzeyleri aslında bağlıdır. Ancak sistemin enerji düzeylerinin, potansiyel yükseklikten küçük olduğu durumlara “bağlı düzeyler” derken sistemin enerji düzeylerinin potansiyel yükseklikten büyük olduğu durumlara ise “genişletilmiş düzeyler” adını vereceğiz. Şekil 4.3 ve şekil 4.4’e sırasıyla bakıldığında θ açısı arttıkça bağlı durum sayısı azalır; şekil 4.3’de üç bağlı durum varken şekil 4.4’de 2 bağlı durum vardır. Kuyu içerisinde orta bölgede uzaysal kuşatmanın etkisi baskındır. Kuyu dışında ise uzaysal kuşatmanın etkisi az iken manyetik kuşatmanın etkisi özellikle büyük z' değerlerine doğru gidildikçe artmaktadır. Bu etki nedeniyle enerji düzeylerinin osilasyon yaptığı görülür ve yörünge merkezi kabul ettiğimiz üç kuantum kuyusunun ortası olan bölgeden

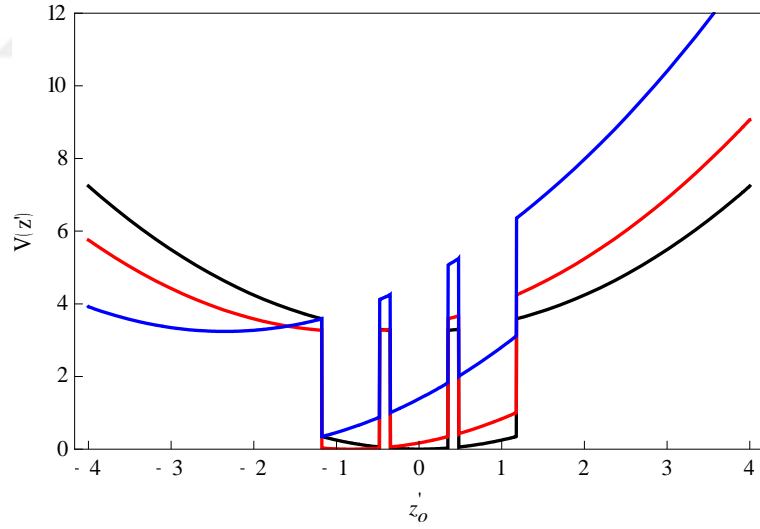
uzaklaştıkça düzeyler külçe Landau düzeylerine dönüşür. Her bir enerji düzeyi için yeteri kadar büyük uzanımlara ulaşıldığında oturduğu görülen Landau düzeyleri arasındaki enerji farkı $\hbar\omega$ kadardır. Açı değeri θ arttıkça potansiyel yükseklik $\cos^2\theta$ ile orantılı ve kuyu genişliği $\cos\theta$ ile orantılı olarak azalır. Şekil 4.3'de görüldüğü gibi kuyu içerisindeki bağlı durum sayısı kuyu sayısı ile aynıdır. Sonuç olarak θ açı değerleri arttıkça enerji düzeylerinin tabana yaklaştığı ve daha küçük z' değerlerinde Landau düzeylerine yerleştiği görülmektedir. Aynı zamanda potansiyel yüksekliğinin artan açı değerleri ile düşmesinden dolayı kuyu içerisinde bağlı durum sayısı da azalır.

Manyetik alan sırasıyla $B=10T$, $B=15T$ ve $B=20T$ olarak alındığında potansiyel yüksekliği azalırken kuyu genişliğinin arttığı görülmektedir.



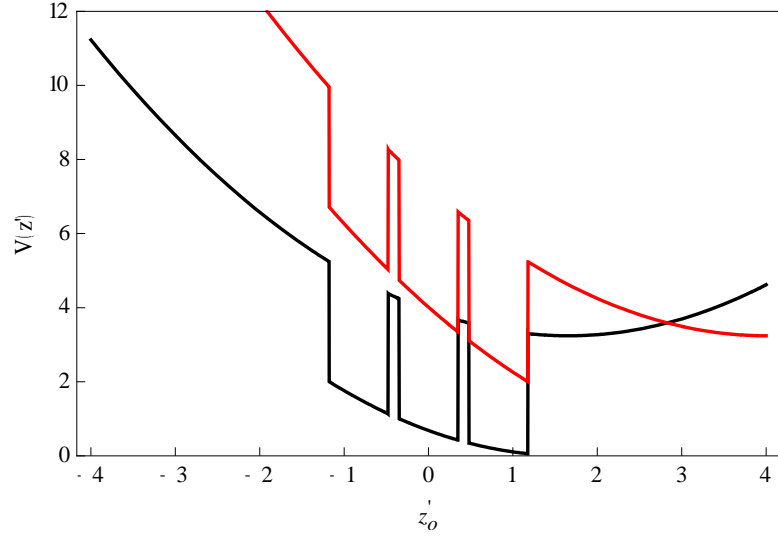


(a)

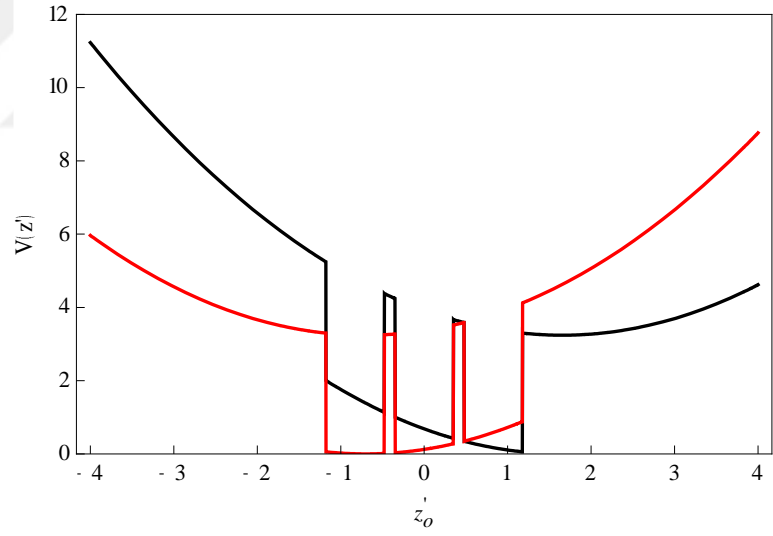


(b)

Şekil 4. 12 $B=10T$ $\theta=60^\circ$ ve $F=0$ değerinde potansiyel profilinin (a) $z'_0 = 0$ (siyah), $z'_0 = 0.85$ (kırmızı), ve $z'_0 = 2.35$ (mavi)'e (b) $z'_0 = 0$ (siyah), $z'_0 = -0.85$ (kırmızı) ve $z'_0 = -2.35$ (mavi) değerlerindeki çizimi.

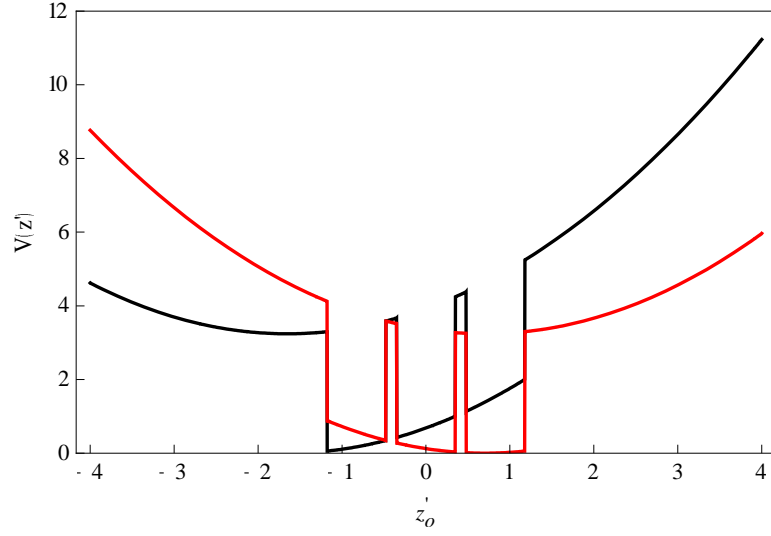


(a)

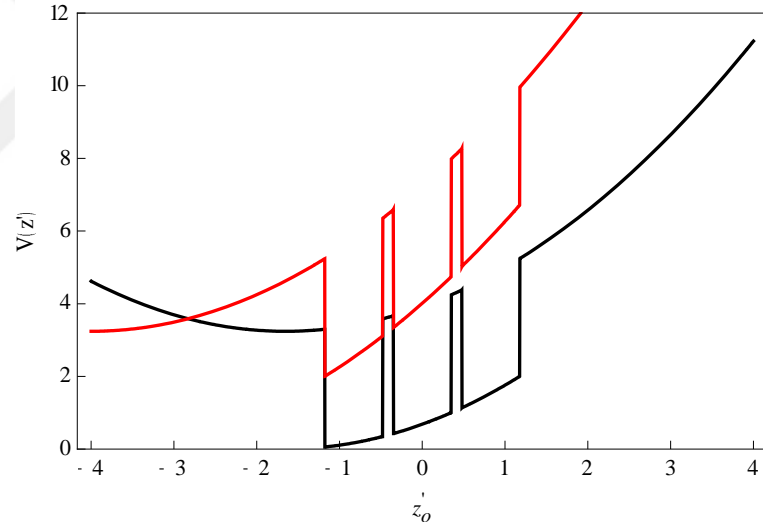


(b)

Şekil 4. 13 $B=10T$ $\theta=60^\circ$ ve $F=50$ kV/cm değerinde potansiyel profilinin (a) $z'_0 = 0$ (siyah), $z'_0 = 2.35$ (kırmızı) (b) $z'_0 = 0$ (siyah) $z'_0 = -2.35$ (kırmızı) değerlerinde çizimi.



(a)



(b)

Şekil 4. 14 $B=10T$ $\theta=60^\circ$ ve $F= -50kV/cm$ değerinde potansiyel profilinin (a) $z'_o = 0$ (siyah) ve $z'_o = 2.35$ (kırmızı) (b) $z'_o = 0$ (siyah) ve $z'_o = -2.35$ (kırmızı) değerlerinde çizimi.

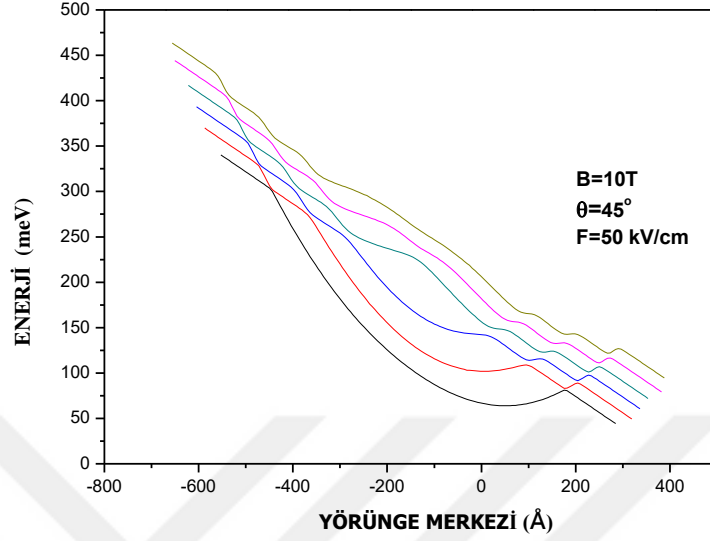
Şekil 4.12 (a ve b)'de örnek olarak seçilen $B = 10T$, $\theta=60^\circ$ ve $F = 0$ değerinde kuyu merkezinin seçimine bağlı olarak üç kuantum kuyusundan oluşan sistemin potansiyel profilinin boyutsuz çizimleri yapılmıştır. Şekil 4.12 (a)'da manyetik alan etkisi ile bir parabolün tabanında ($z'_o = 0$) yerleşmiş olan üç kuantum kuyusundan oluşan potansiyeli (siyah), $z'_o = 0.83$ seçiminiz ile potansiyel

profilinin minimum noktasının sağa kaydığı (kırmızı) ve $z'_0 = 2.35$ seçimimizle de (mavi) daha büyük miktarda sağa kaymanın gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 4.12 (b)'de ise Şekil 4.12 (a)'da seçilen z'_0 değerlerinin negatif değeriyle çizilmiş potansiyel profilleri görülmektedir. $z'_0 = 0$ için siyah renkle, $z'_0 = -0.83$ için kırmızı renkle ve $z'_0 = -2.35$ için de mavi renkle çizilmiştir. Şekil 4.12 (a ve b)'de görüldüğü gibi her bir z'_0 seçimimizin, yeni potansiyel profilinin minimum noktasını oluşturduğu görülmektedir.

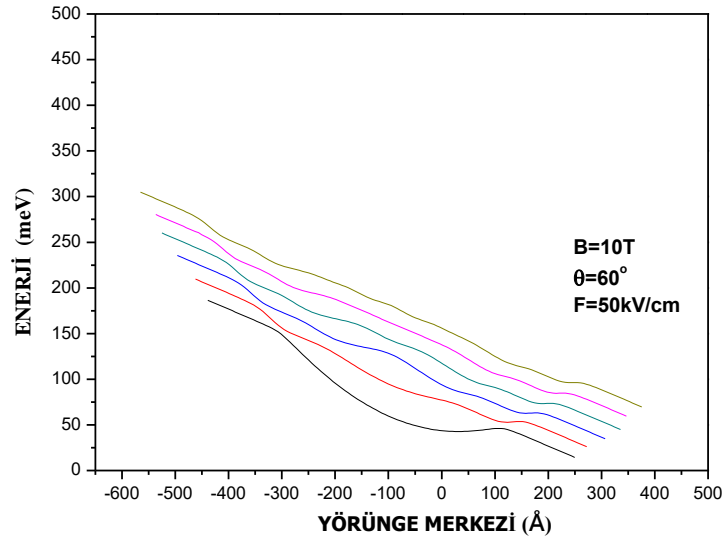
Şekil 4.13 (a)'da örnek olarak seçilen $B = 10T$ ve $\theta=60^\circ$ değerinde $F=50$ kV/cm elektrik alan uygulanması durumunda kuyu merkezi sırası ile $z'_0 = 0$ (siyah), $z'_0 = 2.35$ (kırmızı) seçimleri ile potansiyel profilinin minimum noktasının elektrik alanla eğilmiş olan başlangıç değerine göre daha fazla sağa doğru kaydığı görülmektedir. Şekil 4.13 (b)'de ise $F= 50kV/cm$ iken seçilen kuyu merkezi sırası ile $z'_0 = 0$ (siyah), $z'_0 = -2.35$ (kırmızı) seçilmesiyle elektrik alan etkisiyle alansız duruma göre potansiyel merkezinin $z'_0 + 2\tilde{\beta}$ olan kayma miktarını azaltacak şekilde sola kayma oluşturduğu görülmektedir.

Şekil 4.14 (a)'da ise seçilen kuyu merkezi sırası ile $z'_0 = 0$ (siyah), $z'_0 = 2.35$ (kırmızı), $F= -50kV/cm$ değerinde elektrik alan uygulandığında $z'_0 = 0$ kuyu merkezi seçimine göre elektrik alan etkisinden dolayı kuyu merkezi potansiyel profilinin $z'_0 - 2\tilde{\beta}$ kadar kayarak merkezlendiği ve $z'_0 = 2.35$ seçimimizle de elektrik alanın ters yönde (sola eğimli) oluşturduğu etkiyi azaltacak şekilde potansiyel profilinin sağa doğru kayarak merkezlenmesine neden olduğu görülmektedir. Şekil 4.14 (b)'de ise seçilen kuyu merkezi sırası ile $z'_0 = 0$ (siyah), $z'_0 = -2.35$ (kırmızı) ve $F= -50kV/cm$ değerinde elektrik alan uyguladığından elektrik alanının oluşturduğu sola eğimli potansiyel profilini daha fazla sola kayma oluşturacak şekilde eğdiği görülmektedir. Sırası ile Şekil 4.13(a) ile Şekil 4.14 (b) ve Şekil 4.13(b) ile Şekil 4.14 (a) karşılaştırıldığında elektrik alanın zıt yönlü olarak uygulanmasıyla kuyu merkezi potansiyel profilinin birbirlerinin tersi olduğu görülmektedir. Sonuç olarak seçilen z'_0 değeri potansiyel profilinin minimum noktasını değiştirecek etkiye sahip olduğu açıkça görülmektedir. Bu nedenle yaptığımız tüm çalışma boyunca $z'_0 = 0$ noktası seçimimizi hiç değiştirmeden üç kuantum kuyusundan oluşan sistem potansiyelinin tam ortası (yani 2. kuantum kuyusunun ortası) olarak alınmış ve enerji özdeğerleri bu seçimle bulunmuştur.

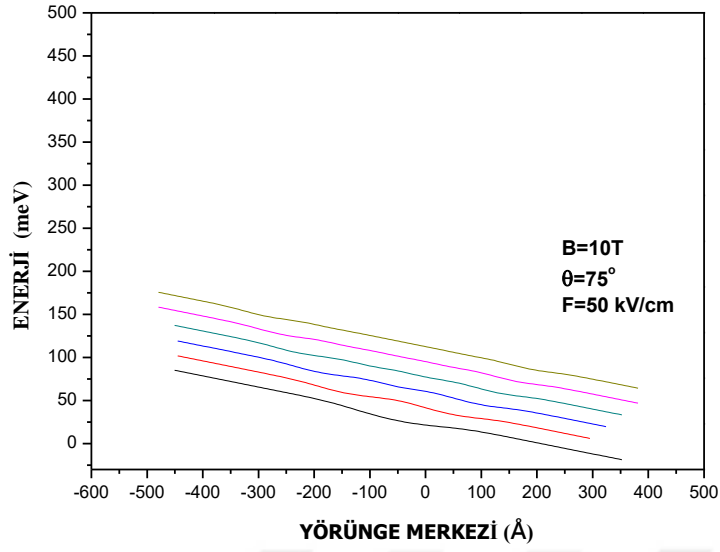
F= 50 kV/cm'lik elektrik alanının elektronik enerji özdeğerlerine etkisini aşağıdaki grafiklerde göreceğiz;



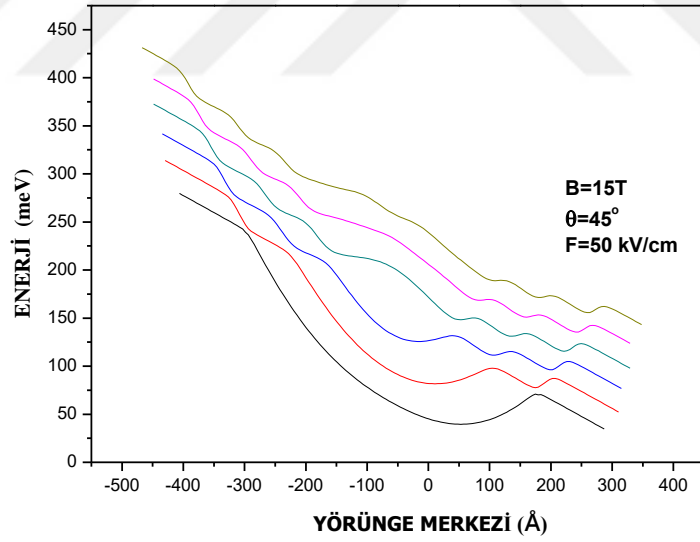
Şekil 4. 15 B = 10T, θ=45°, F=50 kV/cm için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



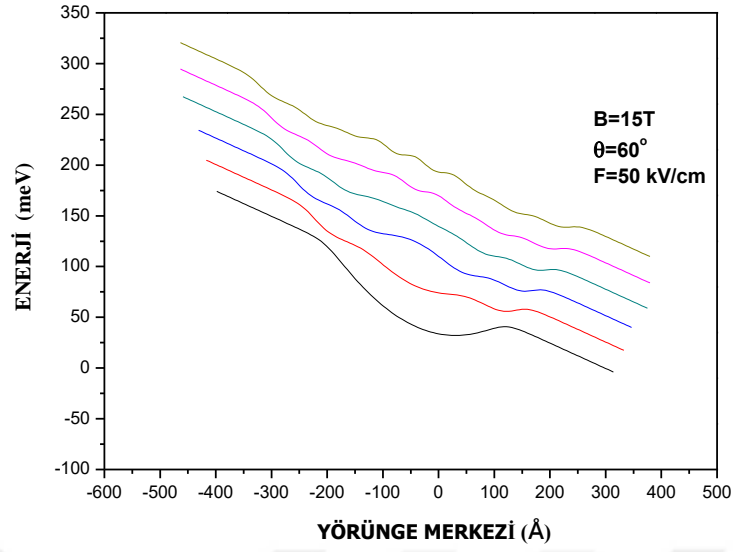
Şekil 4. 16 B = 10T, θ=60°, F=50 kV/cm için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



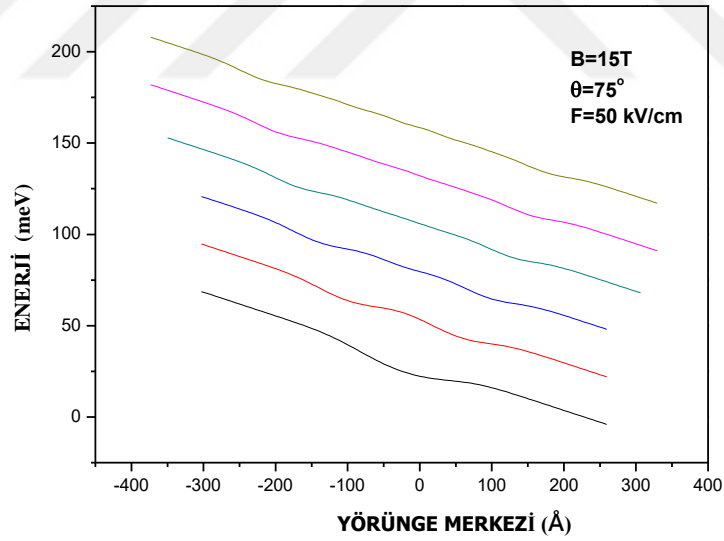
Şekil 4. 17 $B = 10T$, $\theta=75^\circ$, $F=50 \text{ kV/cm}$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



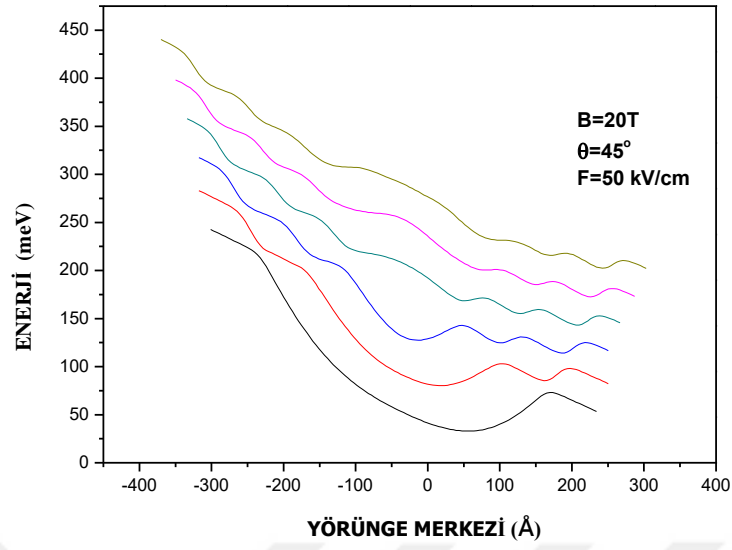
Şekil 4. 18 $B = 15T$, $\theta=45^\circ$, $F=50 \text{ kV/cm}$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



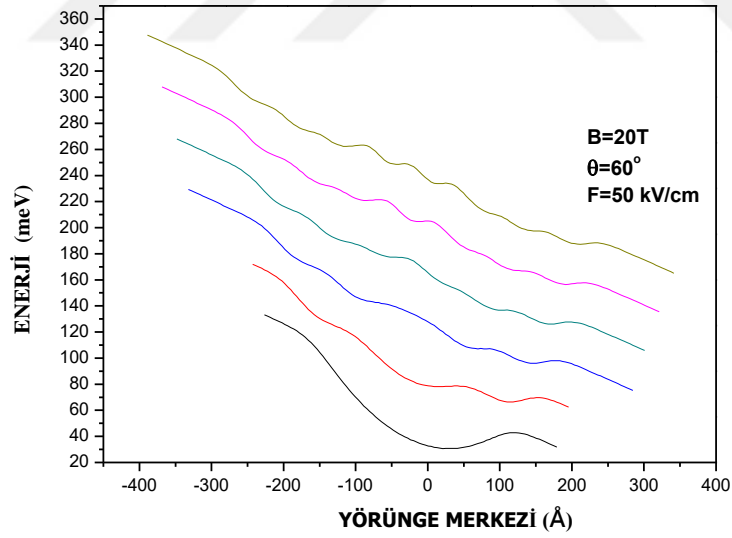
Şekil 4. 19 $B = 15T$, $\theta=60^\circ$, $F=50 \text{ kV/cm}$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



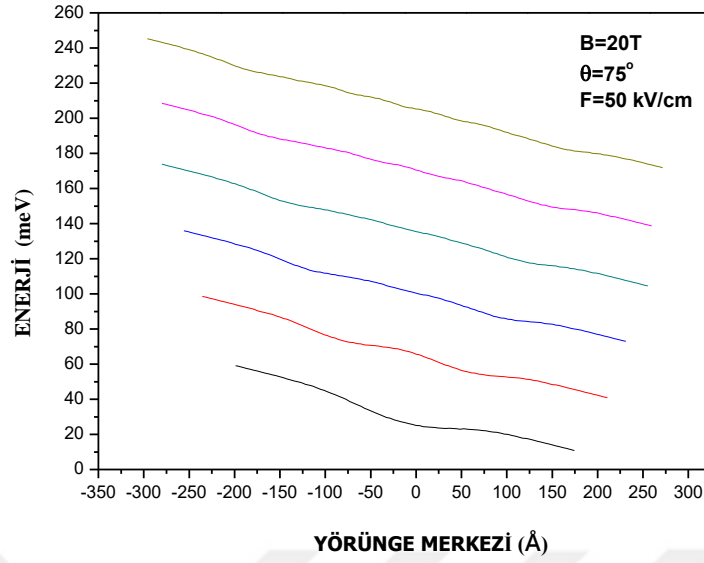
Şekil 4. 20 $B = 15T$, $\theta=75^\circ$, $F=50 \text{ kV/cm}$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



Şekil 4. 21 $B = 20T$, $\theta=45^\circ$, $F=50 \text{ kV/cm}$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



Şekil 4. 22 $B = 20T$, $\theta=60^\circ$, $F=50 \text{ kV/cm}$ için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.



Şekil 4. 23 $B = 20T$, $\theta=75^\circ$, $F=50$ kV/cm için üçlü kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeyinin yörünge merkezine göre değişimi.

Şekil 4.15 - Şekil 4.23 elektrik alan ve manyetik alan altındaki üç kuyulu kuantum sisteminin ilk altı enerji spektrumlarını göstermektedir. Elektrik alanının $F=50$ kV/cm olarak uygulandığı bu spektrumlarda, elektrik alan yokken ($F=0$) üç kuantum kuyu sistemi için çizilen grafiklerden (Şekil 4.3- Şekil 4.11) farklı olarak elektronik enerji spektrumu, F^2 ile orantılı $\tilde{\beta}^2$ eğimli “($\tilde{\beta} = \frac{eFa_H}{\sqrt{2}\hbar\omega_c} \cos \theta = F \cos \theta / w_o\sqrt{2}$)” ve merkezinin de $2\tilde{\beta}$ kadar sağa kaymış olduğu görülmektedir. Açık değeri arttıkça $\tilde{\beta}^2$ ve $2\tilde{\beta}$ azalacağı için enerji spektrumlarının eğimi ve sağa doğru kayma miktarı da azalmaktadır.

θ açı değeri arttıkça enerji spektrumlarındaki eğim azalır. Bu nedenle daha düşük yörünge merkezi değerlerinde Landau düzeyine ulaşır. Grafiklere bakıldığında elektrik alan etkisiyle sağ taraftaki enerji değerlerinin daha düşük sol tarafta ise enerji değerlerinin daha yüksek olduğu görülür. θ açı değeri arttıkça potansiyel yüksekliği azalır; kuyu genişliği ve bariyer genişliği daralır. Elektrik alan etkisi ile eğilen tüm enerji spektrumlarında açı değerlerinin artışı ile enerji özdeğerlerinin daha küçük uzaysal kuşatma değerlerinde Landau düzeylerine oturdukları görülmektedir. Manyetik kuşatmanın etkisindeki üst enerji düzeylerinde (genişletilmiş düzeyler) ise osilasyon genliklerinin küçüldüğü ve uzaysal kuşatmadan daha az etkilendiklerinden elektrik alansız enerji özdeğerleri spektrumdaki başlangıç yörünge merkezi etrafında simetrik olmaya devam ettikleri dikkat çekmektedir.

5. KIRILMA

Newton, ışığın parçacık yapıda olduğunu düşünürken Hertz, ışığın bir elektromanyetik dalga olduğu göstermiştir [31]. Elektromanyetik dalgalar; boşlukta yayılabilen, elektrik ve manyetik alanlarından oluşan enerji dalgalarıdır. Elektromanyetik dalgaların özellikleri, Maxwell denklemlerinden çıkarılabilir.

Işık, parçacık ve elektromanyetik dalga olarak incelendiğinde bir ikileme karşılaşılır. Kuantum mekanik teorisi bu ikilemi çözmüştür. Yani ışığın hem dalga hem de tanecik karakterinin birbirine ters olmadığı anlaşılmıştır. Bu ikilem dualite ilkesi olarak adlandırılır. Bu ilkeye göre fiziksel olaylardan bazılarında tanecik karakteriyle bazılarında da dalga karakteriyle ışık açıklanabilir. Bu iki karakter bir arada kullanılarak herhangi bir fiziksel olayı açıklamak mümkün değildir. Örneğin; Girişim, kırınım, polarizasyon gibi fizik olayları dalga karakteriyle açıklanırken, siyah cisim ışıması, fotoelektrik olay, Compton olayı gibi fizik olayları da parçacık karakteriyle açıklanır [33].

Foto detektörlerde ve yüksek hızlı elektro optik cihazlarda bantlararası optik soğurma yaygın şekilde kullanılmaktadır. Son zamanlarda birçok çalışmada lineer ve lineer olmayan bantlar arası optik soğurma ve düşük boyutlu sistemlerdeki kırılma indisi değişiklikleri yoğun bir şekilde incelenmiştir [34-46]. Yarıparabolik kuantum sistemlerinde elektrik alanın lineer ve lineer olmayan soğurma katsayıları ve bantlararası geçişler için kırılma indisleri üzerindeki etkileri Zhang tarafından araştırılmıştır [36,37]. V şeklindeki kuantum telinde kırılma indisi değişiklikleri ve bantlararası optik soğurma katsayıları Khordad ve Khaneghah tarafından incelenmiştir [43]. Uygulanan elektrik ve manyetik alan altında V-şekilli kuantum kuyusundaki lineer ve lineer olmayan bantlar arası optik soğurma katsayıları ve kırılma indisindeki değişiklikler U. Yeşilgül ve arkadaşları tarafından incelenmiştir [47]. Bu çalışma sonucunda soğurma katsayısı ve kırılma indisindeki lineer değişikliklerin gelen optik yoğunluk ile ilişkili olmadığı, gelen optik yoğunluğun üçüncü dereceden lineer olmayan terimleri etkilediği görülür. Gelen optik yoğunluk arttıkça soğurma katsayısı ile kırılma indisindeki toplam terimlerin azaldığı anlaşılır. Ayrıca manyetik alanın artan değerlerinde toplam kırılma indisi daha büyük enerjilere doğru kayar ve toplam kırılma indisinin büyüklüğü azalır. Elektrik alanın artan değerlerinde ise toplam kırılma indisi daha küçük enerjilere doğru kayar ve toplam kırılma indisi büyüklüğü azalır.

Eğik manyetik alan altında kuantum sisteminde lineer ve üçüncü dereceden lineer olmayan terimler dahil manyetik alan kuvvetinin ve yönünün toplam soğurma katsayısı üzerindeki etkileri ve kırılma indisi değişimleri R. Özbakır tarafından araştırılarak hem soğurma katsayısı hem de kırılma indisinin manyetik alan büyüklüğü ve yönüne duyarlı olduğu gösterilmiştir [48]. Bu araştırmaya göre hem soğurma katsayısı hem de kırılma indisinin, kuyu boyutlarına, açı değerlerine, elektrik alan ile manyetik alan büyüklüğü ve yönüne duyarlı olduğu anlaşılmıştır. Asimetrik kuantum kuyu yapılarında toplam optik soğurma katsayısına lineer ve lineer olmayan katkıların rolleri incelenmiş ve kuyu parametrelerinin değişimiyle toplam soğurma katsayısının kontrol edilebileceği İ. Karabulut tarafından çalışılmıştır [49].

Bu çalışmamızda daha önce bulmuş olduğumuz sistemi tanımlayan enerji özdeğerlerini de kullanarak mathematica programında kırılma indisi katkılarını tanımlayan (lineer, lineer olmayan ve toplam) parçayı da ilave ederek üç kuyulu kuantum kuyularında elektrik alanının sıfır veya $F=50k V/cm$ değerleri için farklı θ açıları ($\theta=45$, $\theta=60$, $\theta=75$), farklı manyetik alanlar ($B=10T$, $B=15T$, $B=20T$) için kırılma indisinin foton enerjisine karşı grafikleri çizilmiştir.

5.1 Teori

i. enerji düzeyi ile j. enerji düzeyi arasındaki lineer kırılma indisi aşağıdaki gibidir;

$$\begin{aligned} & \frac{\Delta n^{(1)}(\omega)}{n_r} \\ &= \frac{\sigma_V |M_{ij}|^2}{2n_r^2 \varepsilon_0} \frac{\Delta E - \hbar\omega}{(\Delta E - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma_{ij})^2} \end{aligned} \quad (24)$$

Lineer olmayan (nonlinear) kırılma indisi;

$$\begin{aligned} \frac{\Delta n^{(3)}(\omega, I)}{n_r} &= \frac{\mu c |M_{ij}|^2}{4n_r^3 \varepsilon_0} \frac{\sigma_V I}{\left[(\Delta E - \hbar\omega)^2 + (\hbar\Gamma_{ij})^2 \right]^2} \\ & \left\{ 4|M_{ij}|^2 - \frac{|M_{jj} - M_{ii}|^2}{(\Delta E)^2 + (\hbar\Gamma_{ij})^2} [\Delta E(\Delta E - \hbar\omega) - (\hbar\Gamma_{ij})^2] \right. \\ & \left. - \frac{(\hbar\Gamma_{ij})^2 (2\Delta E - \hbar\omega)}{(\Delta E - \hbar\omega)} \right\} \end{aligned} \quad (25)$$

Toplam kırılma indisi de (lineer kırılma indisi ve lineer olmayan kırılma indisinin toplamıdır.) şu şekildedir [48];

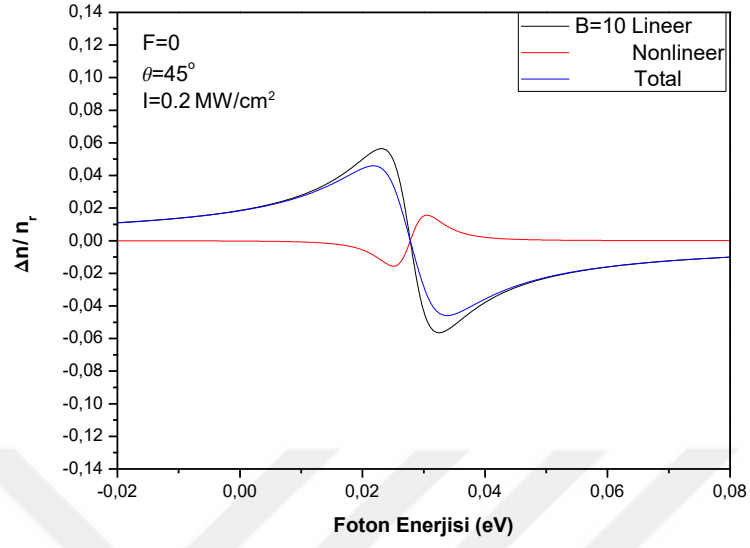
$$\frac{\Delta n(\omega, I)}{n_r} = \frac{\Delta n^{(1)}(\omega)}{n_r} + \frac{\Delta n^{(3)}(\omega, I)}{n_r} \quad (26)$$

Burada n_r kırılma indisi, σ_V elektron yoğunluğu, μ geçirgenlik, ω gelen fotonun açılmal frekansı, ε_0 boş uzayın dielektrik sabiti, Γ_{ij} i. ve j. enerji düzeyleri arasındaki durulma zamanı, I gelen ışığın optik yoğunluğudur. $\Delta E = E_j - E_i$ i. ve j. enerji düzeyleri arasındaki enerji farkı ve M_{ij} elektrik dipol moment matris elemanıdır ve boyutsuz olarak

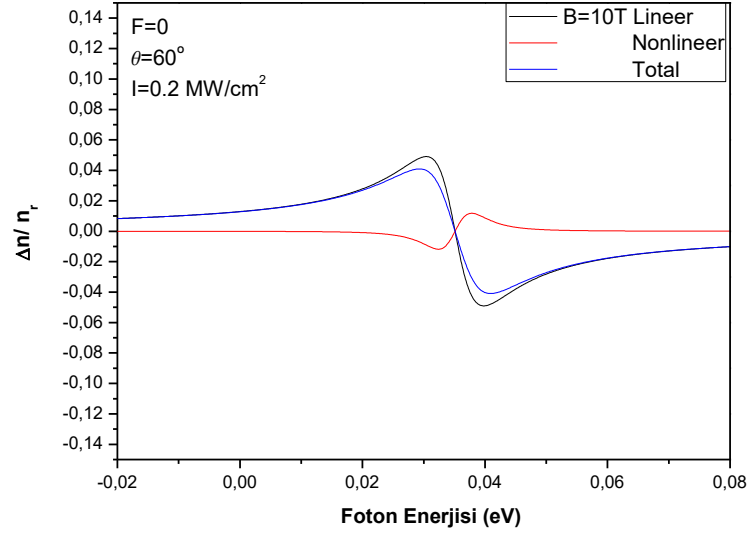
$$M_{ij} = \left| \left\langle \phi(\xi)_i \left| \xi \right| \phi(\xi)_j \right\rangle \right| \text{ olarak tanımlanır.}$$

Çalışmamızın bu bölümünde $\varepsilon_0 = 12.58$, $m^* = 0.067 m_0$ (burada m_0 serbest elektron kütlesi), $V_0 = 225 [meV]$, $n_r = 3.2$, $T_{12} = 0.14 [ps]$, $\Gamma_{12} = 1/T_{12}$, $\mu = 4\pi \times 10^{-7} [Hm^{-1}]$, $I = 2.0 \times 10^9 [W/m^2]$, $\sigma_V = 3.0 \times 10^{22} [m^{-3}]$ değerleri kullanarak enerji özdeğerlerini daha önce bulduğumuz sistemin bandıçı izinli geçişleri için lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisinin gelen ışık enerjisine göre değişim grafikleri çizilmiş yorumları yapılmıştır.

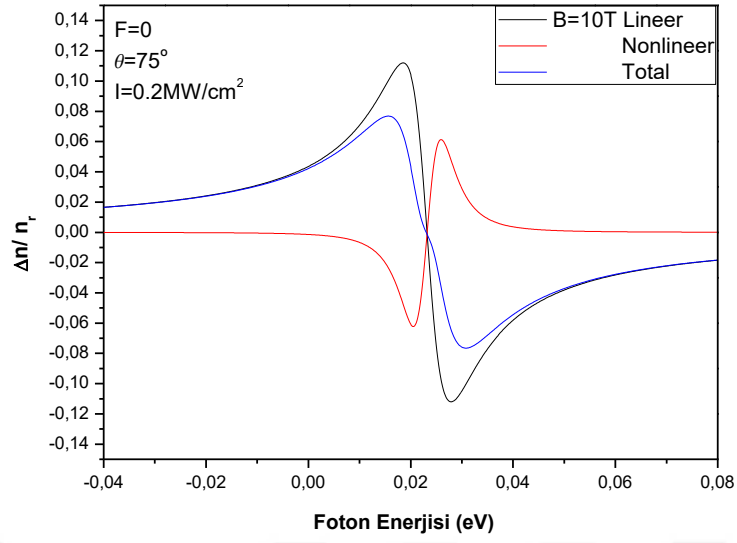
5.2 Veriler ve yorumlar



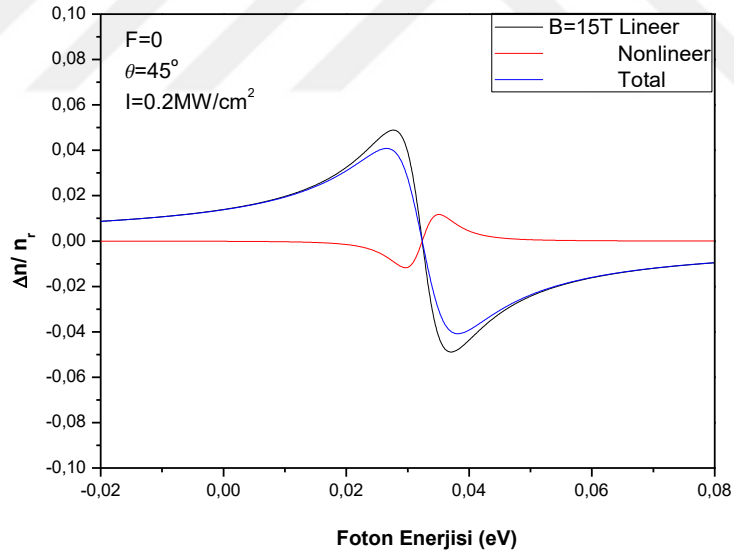
Şekil 5. 1 $B=10\text{ T}$, $\theta=45^\circ$, $F=0$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



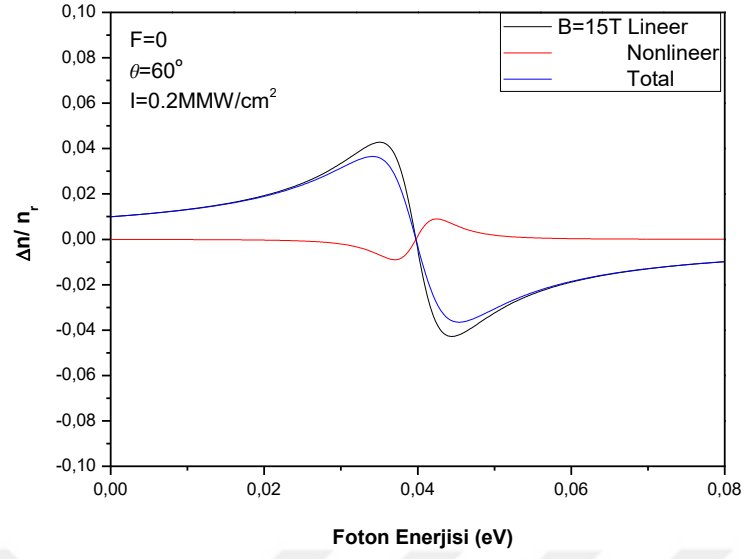
Şekil 5. 2 $B=10\text{ T}$, $\theta=60^\circ$, $F=0$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



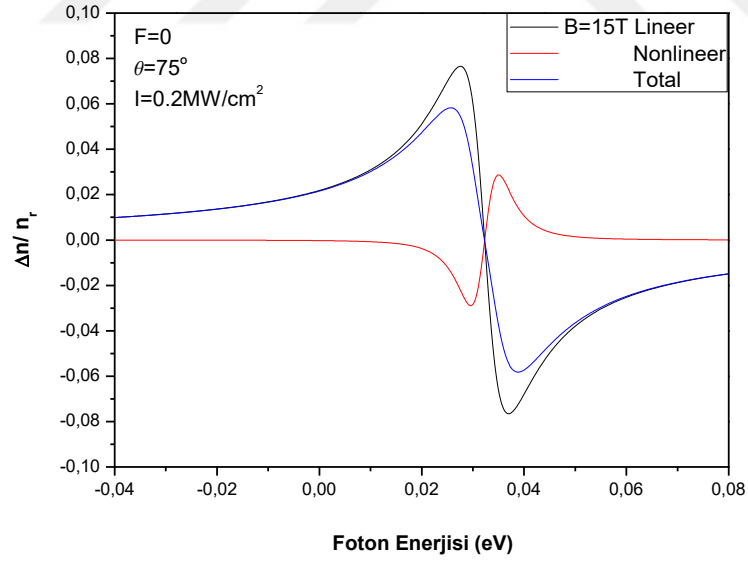
Şekil 5. 3 $B=10T$, $\theta=75^\circ$, $F=0$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



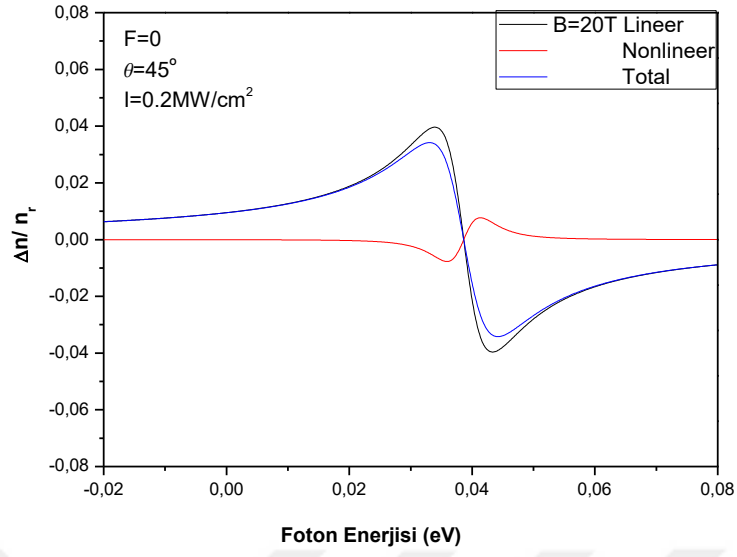
Şekil 5. 4 $B=15T$, $\theta=45^\circ$, $F=0$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



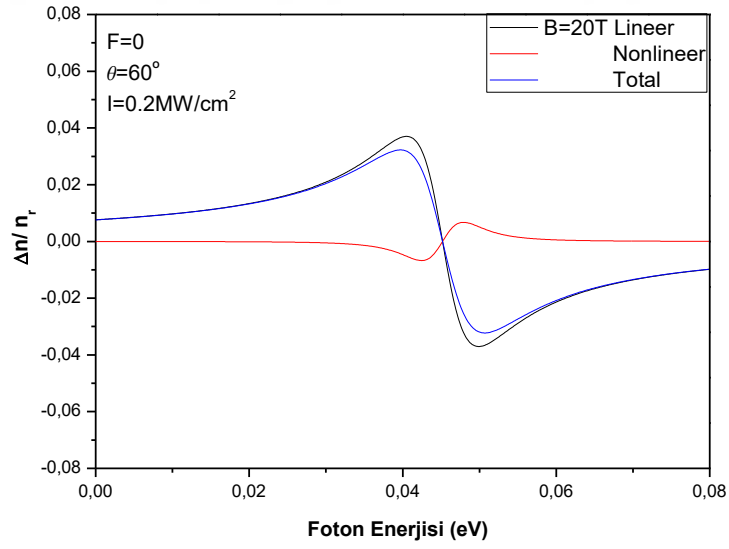
Şekil 5. 5 $B=15T$, $\theta=60^\circ$, $F=0$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



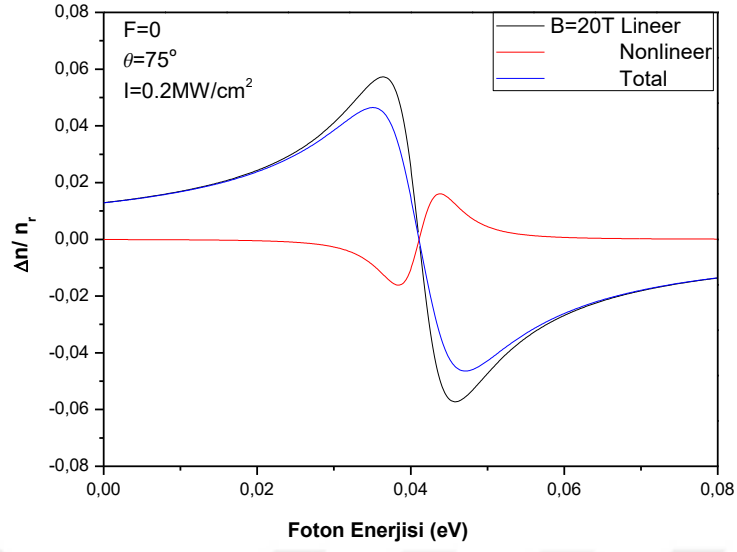
Şekil 5. 6 $B=15T$, $\theta=75^\circ$, $F=0$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



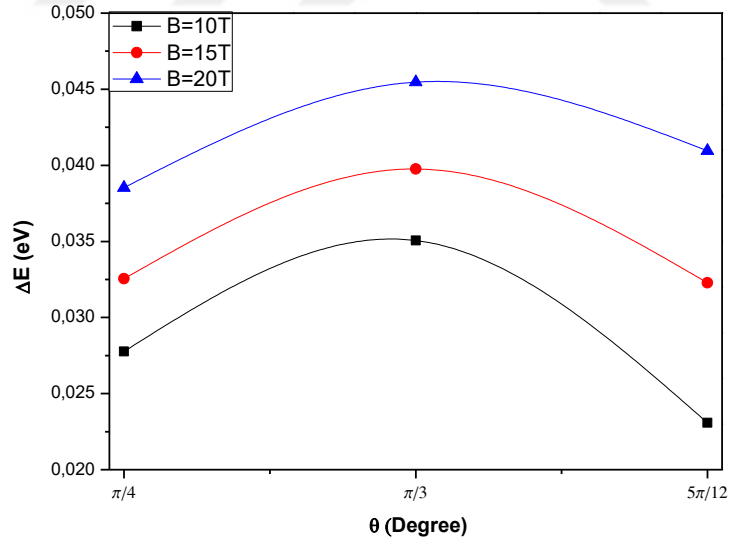
Şekil 5. 7 $B=20T$, $\theta=45^\circ$, $F=0$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



Şekil 5. 8 $B=20T$, $\theta=60^\circ$, $F=0$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



Şekil 5. 9 $B=20T$, $\theta = 75^\circ$, $F=0$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.

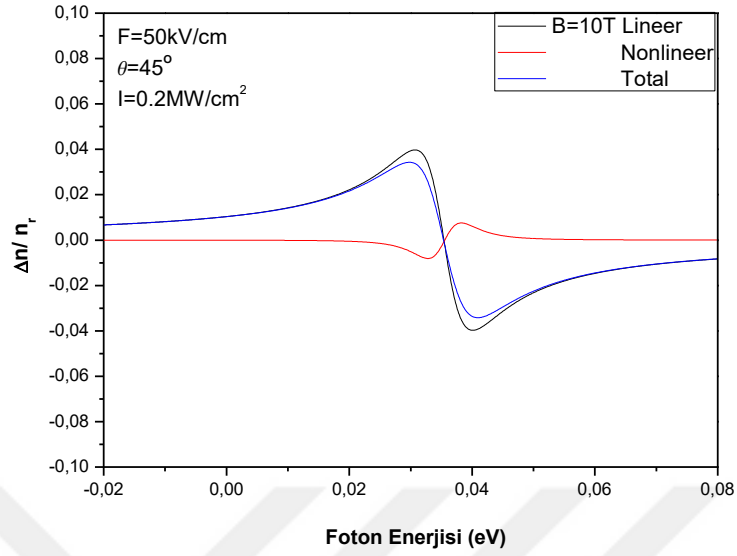


Şekil 5. 10 1-2 geçişi için farklı manyetik alan değerlerinde ($B=10T$, $B=15T$, $B=20T$) eğiklik açısının fonksiyonu olarak ΔE enerji farkı grafiği.

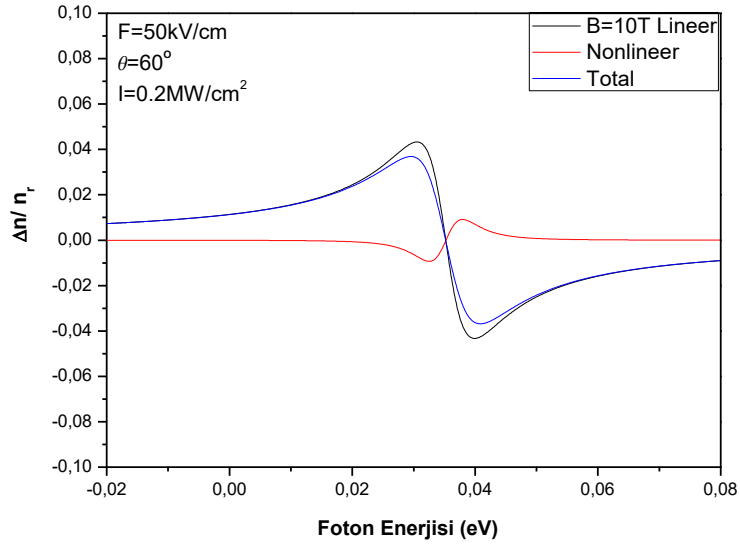
Şekil 5.1 – şekil 5.9 manyetik alanın x' eksenine ile yapmış olduğu θ açı değerleri arttıkça kırılma indisinin foton enerjisine karşılık gelen grafikleri çizilmiştir. 60° ye kadar artan θ açısıyla lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisi grafiklerinde

foton enerjisi önce artarak sağa (maviye) doğru, açının 75^0 olduğu durumda ise foton enerjilerinin azalarak sola (kırmızıya) doğru kaydığı görülmektedir. Bu durumu Şekil 5.10'da her bir manyetik alan değeri için açı değerlerine karşı ΔE değerlerinin çizildiği grafikte açıklayabiliriz. Açı değerinin artması ile etkin kuyu genişliği ve etkin potansiyel yükseklik azalmaktadır. Şekil 5.10'da görüldüğü gibi tüm manyetik alan değerleri için açının 45^0 den 60^0 ye arttığı durumlarda ΔE değerleri de artmaktadır. Bu nedenle kuyu bölgesinde bağlı olan bu ilk iki enerji düzeyi arasındaki fark da (ΔE) açı değerinin artmasıyla artmaktadır. Şekil (5.1,5.2), Şekil (5.4,5.5) ve Şekil (5.7,5.8) kırılma indisi grafiklerinde, 45^0 deki foton enerji değerinin 60^0 deki foton enerjisinden daha büyük olduğu, dolayısıyla 60^0 ye kadar spektrumun sağa doğru (maviye) kaydığı görülmektedir. $\theta = 75^0$ olduğunda (Şekil (5.3), Şekil (5.6) ve Şekil (5.9)) manyetik alanın küçük değerinde daha küçük ΔE değerlerine sahip olmaktadır. Bunun sebebi açının 75^0 olduğu durumda kuyu genişliği ve bariyer yüksekliği çok küçülmüştür 1. enerji düzeyi yukarı doğru kayarken 2. Enerji düzeyi de genişletilmiş düzey formuna geçmiştir. Böylece ilk iki enerji düzeyi arasındaki ΔE farkı 60^0 de görülen duruma göre azalmıştır. Manyetik alanın artışı tüm açı durumları için ΔE değerlerini artırmaktayken 75^0 için manyetik alanın artması gittikçe daha çok azalan ΔE değerlerini vermektedir. Bu da diğer küçük açı değerlerine göre 75^0 de kırılma indisi spektrumunun sola (kırmızıya) kaymasının sebebidir. Ayrıca toplam kırılma indisi pik değerleri açı değerlerinin artışı ile özellikle 75^0 de oldukça büyük bir oranda artmaktadır.

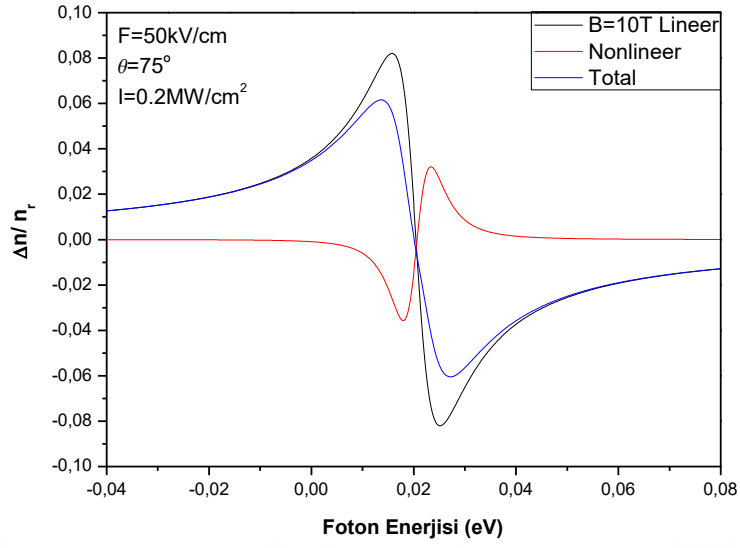
Elektrik alan uygulandığında elde edilen grafikler;



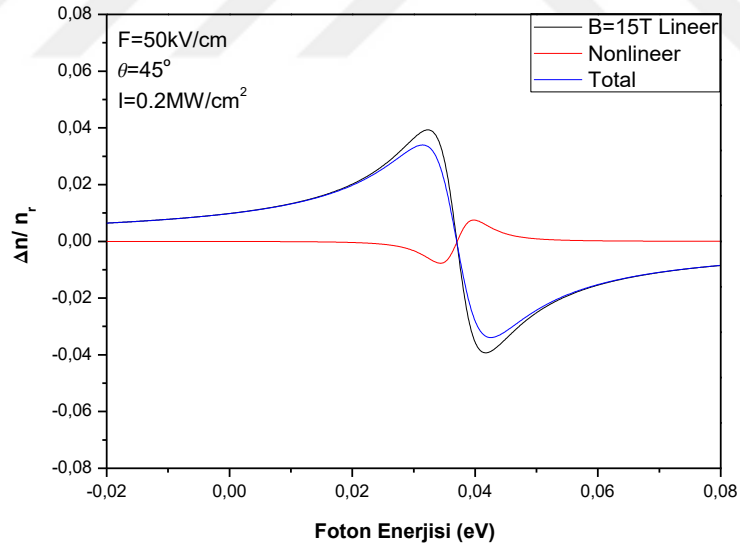
Şekil 5. 11 $B=10T$, $\theta=45^\circ$, $F=50kV/cm$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



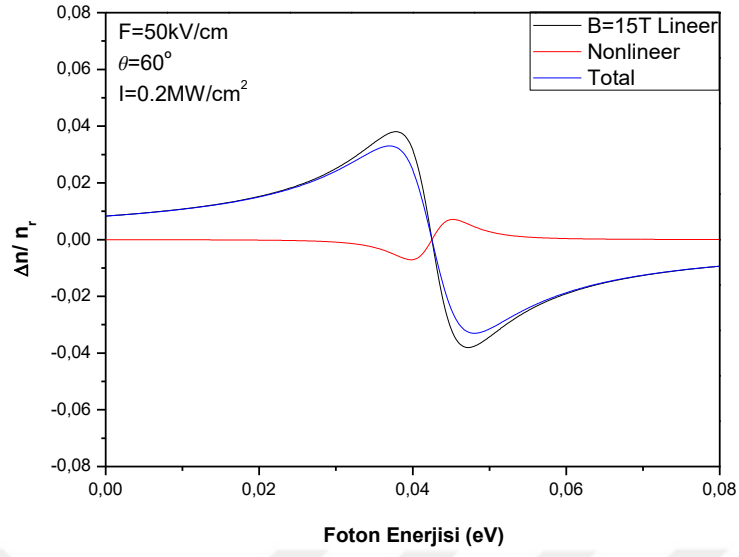
Şekil 5. 12 $B=10T$, $\theta=60^\circ$, $F=50kV/cm$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



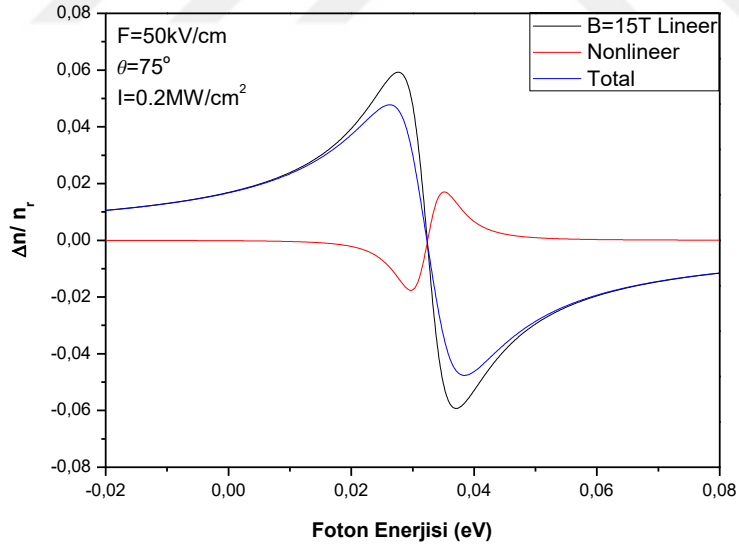
Şekil 5. 13 $B=10T$, $\theta =75^0$, $F=50 kV/cm$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



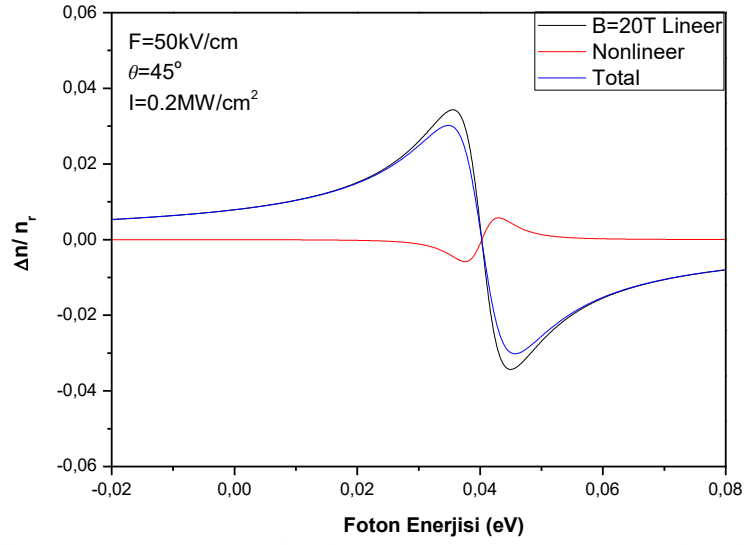
Şekil 5. 14 $B=15T$, $\theta =45^0$, $F=50 kV/cm$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



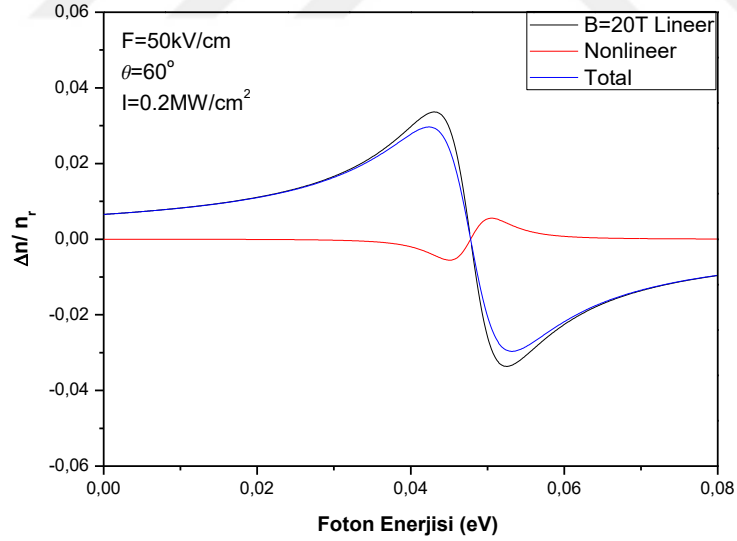
Şekil 5. 15 $B=15T$, $\theta=60^\circ$, $F=50kV/cm$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



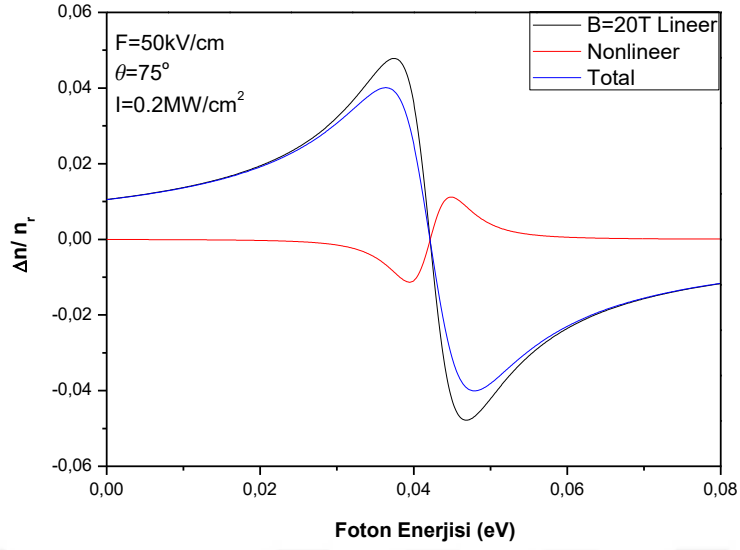
Şekil 5. 16 $B=15T$, $\theta=75^\circ$, $F=50kV/cm$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



Şekil 5. 17 $B=20T$, $\theta=45^\circ$, $F=50kV/cm$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



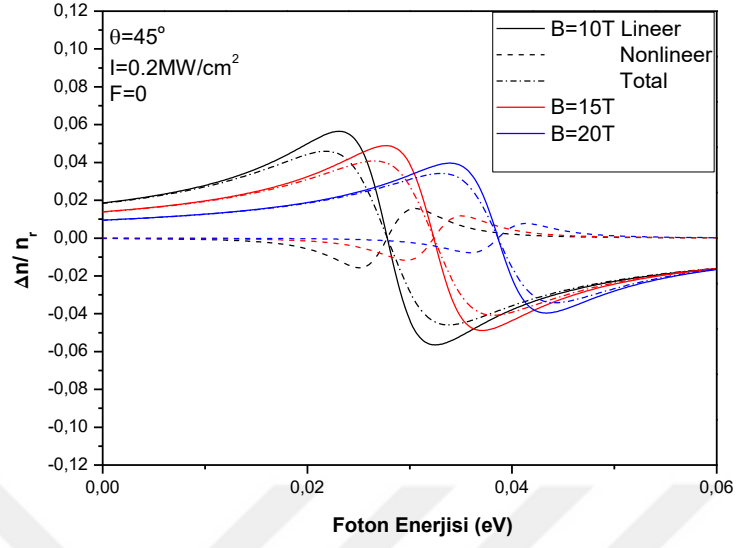
Şekil 5. 18 $B=20T$, $\theta=60^\circ$, $F=50kV/cm$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



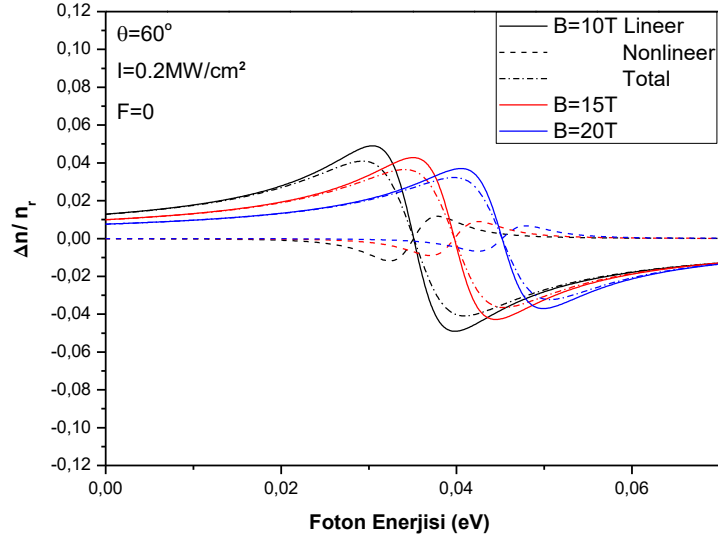
Şekil 5. 19 $B=20\text{T}$, $\theta=75^\circ$, $F=50\text{ kV/cm}$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.

Şekil 5.11 – şekil 5.19’da elektrik alanının $F=50\text{kV/cm}$ değerinde, manyetik alanın x' eksenine ile yapmış olduğu θ açısı değerleri arttıkça sırasıyla 10 T, 15 T ve 20 T manyetik alan değerlerinde kırılma indisinin foton enerjisine karşılık grafikleri çizilmiştir. Artan θ açısıyla lineer, lineer olmayan, toplam kırılma indisi grafiklerinde foton enerjisi önce artarak sağa (maviye) doğru sonra lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisi grafiklerinde foton enerjisi azalarak sola (kırmızıya) doğru kayar. Lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisinin pik noktalarının arttığı görülmektedir. Elektrik alanı uygulandığında görülen lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisinin pik değerleri, elektrik alanın etkisi yokken görülen lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisinin pik değerlerinden düşüktür. Bu durum elektrik alanının sisteme uygulanmasıyla bandiçi taban ve ilk uyarılmış düzey arasındaki geçişler için kırılma indisinin düşmesine sebep olduğunu göstermektedir.

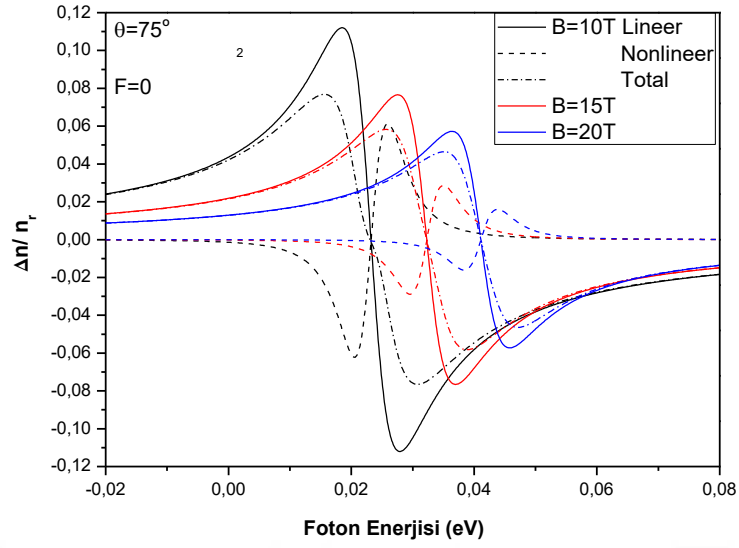
Manyetik alan değişimini gösteren grafiklerimiz



Şekil 5. 20 B=10T, B=15T, B=20T iken $\theta = 45^\circ$, F=0 için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



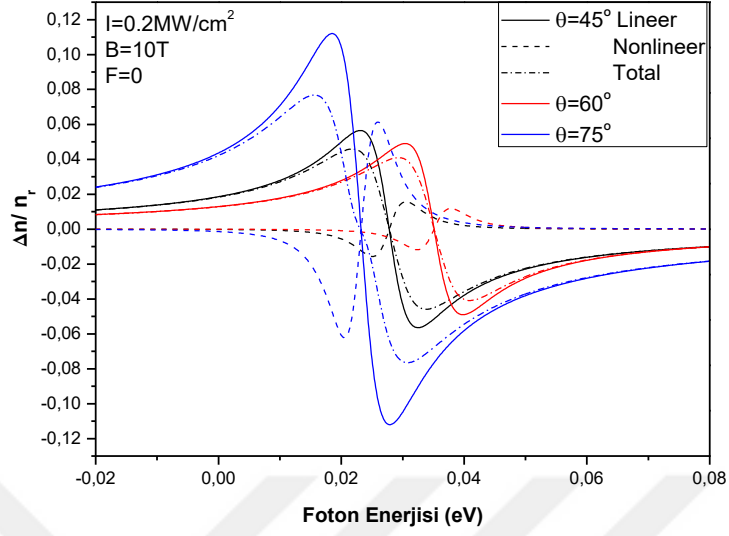
Şekil 5. 21 B=10T, B=15T, B=20T iken $\theta = 60^\circ$, F=0 için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



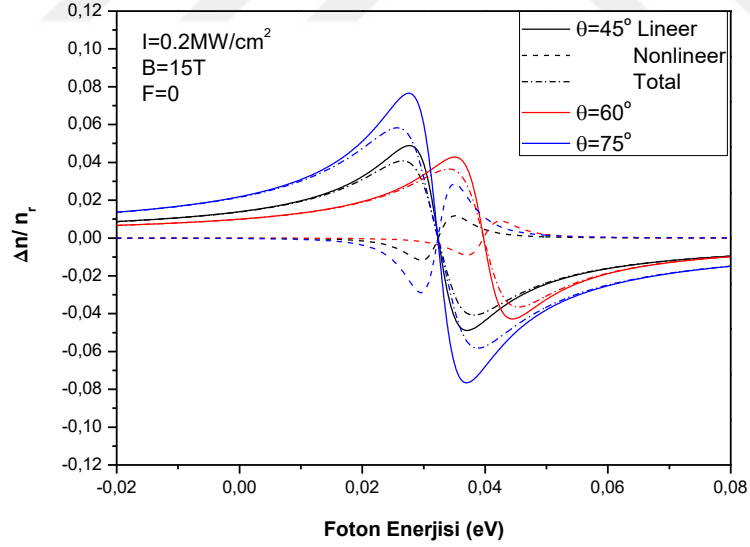
Şekil 5. 22 B=10T, B=15T, B=20T iken $\theta = 75^0$, F=0 için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.

Şekil 5.20 – şekil 5.22 farklı manyetik alanlarda kırılma indisinin foton enerjisine karşılık gelen grafikleri çizilmiştir. Bu grafiklerde görüldüğü gibi artan manyetik alanla foton enerjisi de artarak sağa (maviye) doğru kayar. 45^0 den 60^0 ye açının artmasıyla foton enerji değerleri tüm manyetik alan değerleri için artarak maviye kaymaktadır. 75^0 'de ise tüm manyetik alan değerleri için foton enerjisi Şekil5.20'de görülen durumdan daha küçük değerlere doğru olmak üzere kırmızıya kaymaktadır. Bunun sebebi 75^0 'de ΔE değerlerinin azalmasındandır. Şekil 5.20-5.22 grafikleri göz önüne alındığında açı değerlerinin artması toplam kırılma indisi pik yüksekliklerini önce küçük miktarda azaltıp 75^0 'de ise büyük oranda artırmaktadır.

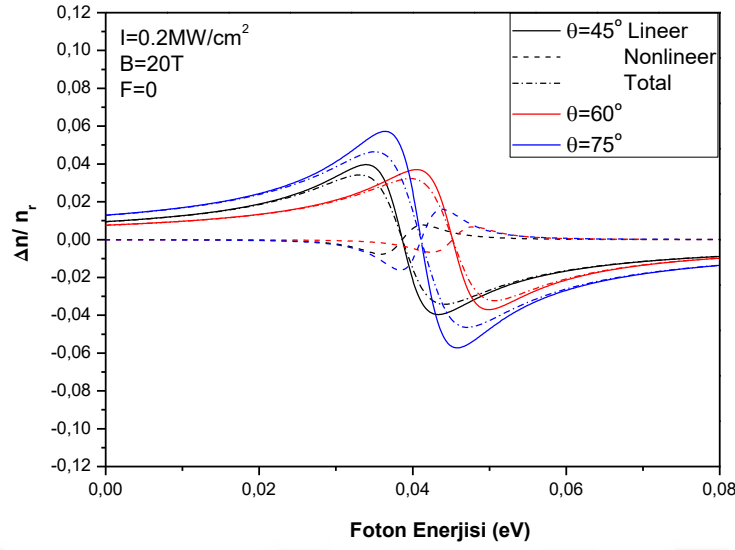
Artan aç ı değerlerine göre grafiklerimiz



Şekil 5. 23 $\theta = 45^\circ, \theta = 60^\circ, \theta = 75^\circ$ iken $B=10T, F=0$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değ işimleri.



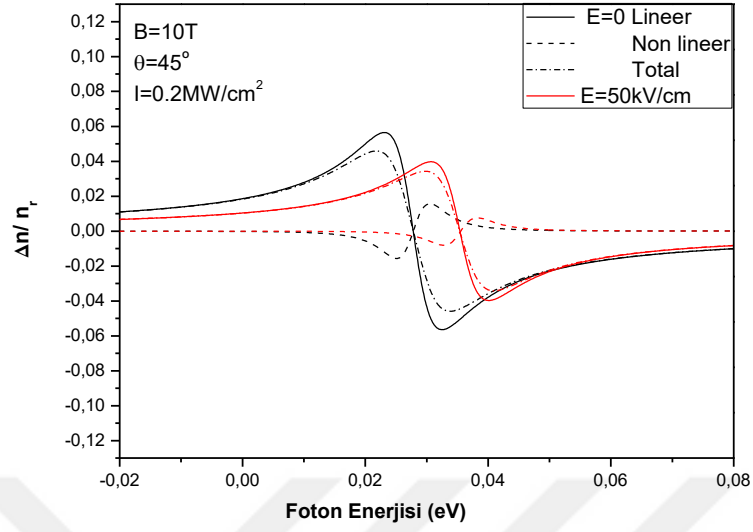
Şekil 5. 24 $\theta = 45^\circ, \theta = 60^\circ, \theta = 75^\circ$ iken $B=15T, F=0$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değ işimleri.



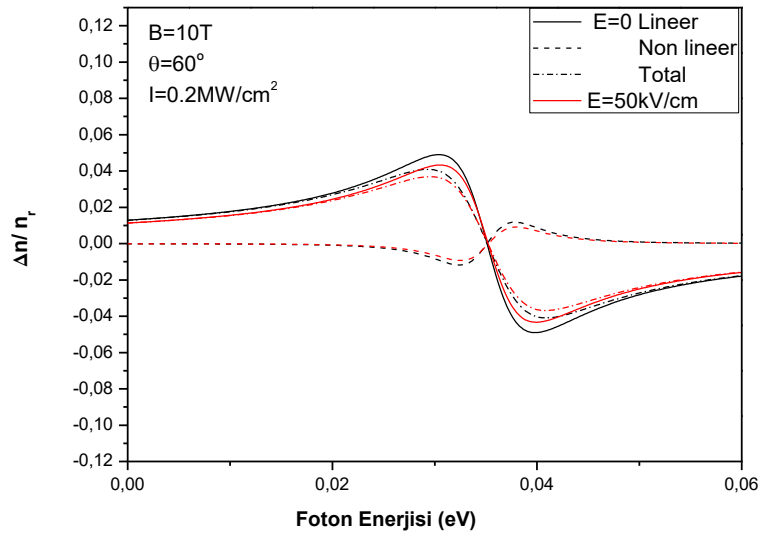
Şekil 5. 25 $\theta = 45^\circ, \theta = 60^\circ, \theta = 75^\circ$ iken $B=20\text{T}, F=0$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.

Şekil 5.23 – şekil 5.25 Manyetik alanın x' ekseni ile yapmış olduğu farklı θ açılı değerlerine göre kırılma indisinin foton enerjisine karşılık gelen grafikleri çizilmiştir. Şekil 5.23-5.25'de görüldüğü gibi tüm manyetik alan değerleri için kırılma indisi grafiklerinde foton enerjileri artarak sağa (maviye) doğru kaymaktadır. Bunun sebebi manyetik alanın büyüyen değerlerinin, açılı değerlerinin artışı ile ΔE enerji farklarını artırmasından kaynaklanmaktadır. Manyetik alanın artan değerlerinin en etkili olarak 75° için çizilen kırılma indisi grafiğinde olduğu görülmektedir. Bu açılı değerinde kırılma indisi diğer açılı değerlerindeki kırılma indisi grafiklerindeki sağa kaymadan çok daha hızlı şekilde kaymaktadır. Manyetik alan arttıkça sistemimizin potansiyel profilinin parabolik hali daha kapalı ve derinleşirken açının 75° olması da uzaysal kuşatma etkisinden kurtularak genişletilmiş düzey formuna çıkan 2. Enerji düzeyi ile uzaysal kuşatma bölgesinde kalan 1. Enerji düzeyi arasındaki farkın da hızla artmasından kaynaklanmaktadır. $B=15\text{ T}$ için 45° ve 75° açılı değerleri aynı enerji değerini göstermektedir. Şekil (5.10)'da $B=15\text{ T}$ için çizilen grafikten de görüldüğü gibi bahsedilen iki açılı değerinde 1. ve 2. Enerji düzeyleri arasındaki fark birbirine eşittir. Ayrıca tüm açılı değerleri için lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisinin pik değerlerinin küçük miktarda azaldığı bu azalmanın 75° açılı değerinde daha büyük olduğu görülmektedir.

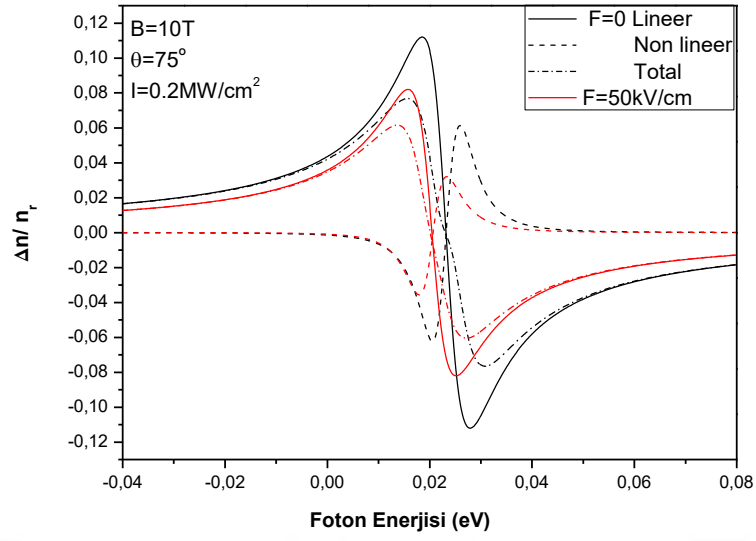
Elektrik alan değişimini gösteren grafiklerimiz



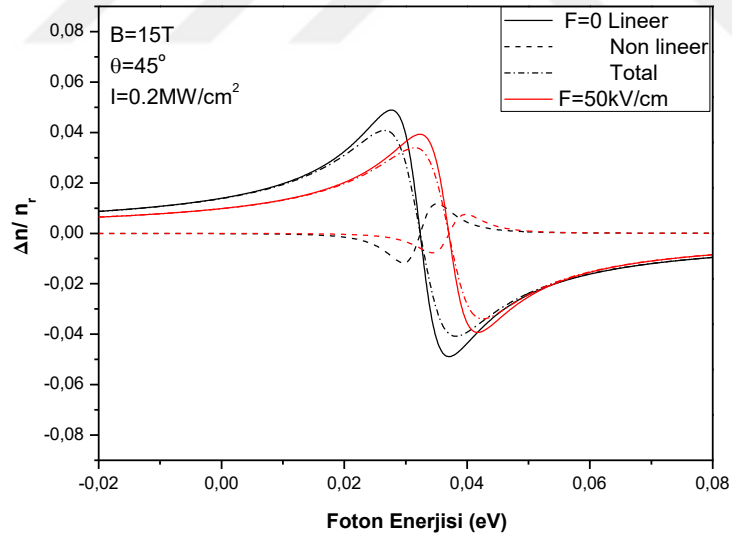
Şekil 5. 26 $F=0$ ve $F=50k V/cm$ iken $B=10T$, $\theta = 45^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



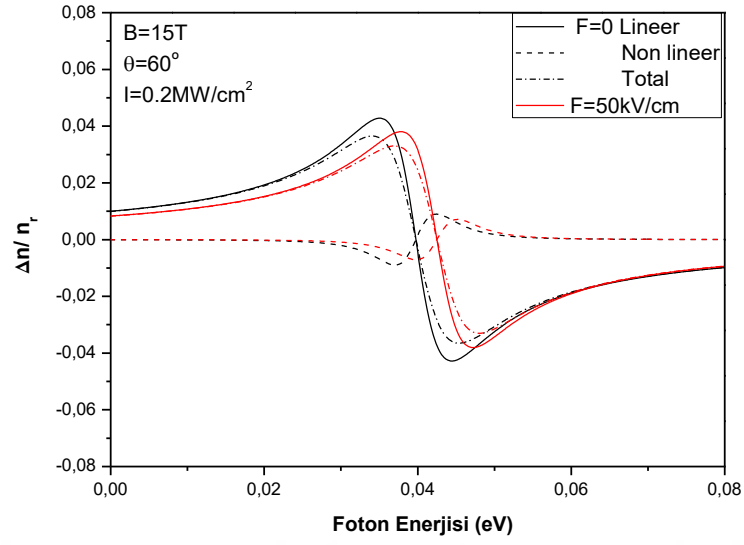
Şekil 5. 27 $F=0$ ve $F=50k V/cm$ iken $B=10T$, $\theta = 60^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



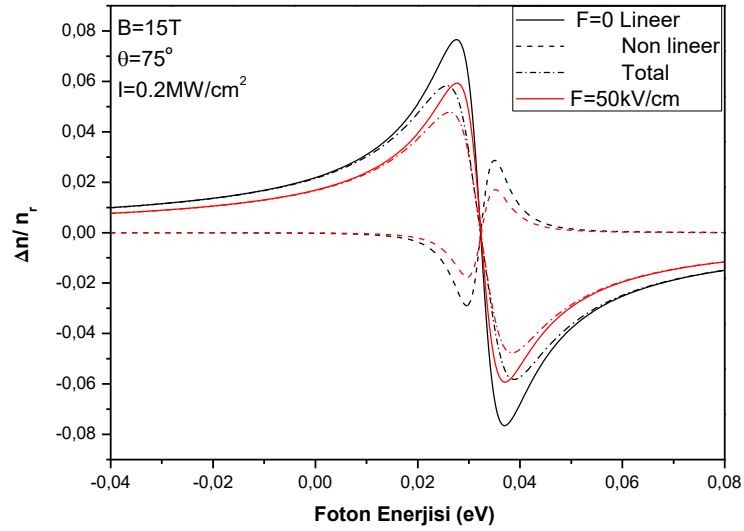
Şekil 5. 28 $F=0$ ve $F=50kV/cm$ iken $B=10T$, $\theta = 75^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değışimleri.



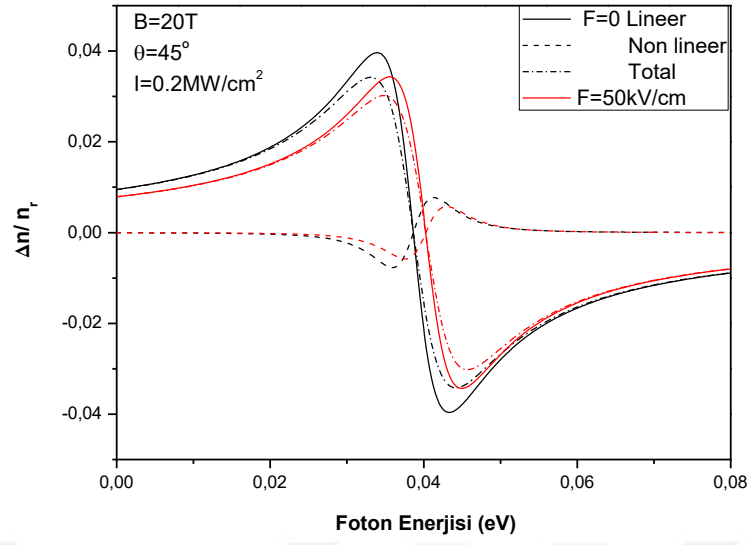
Şekil 5. 29 $F=0$ ve $F=50kV/cm$ iken $B=15T$, $\theta = 45^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değışimleri.



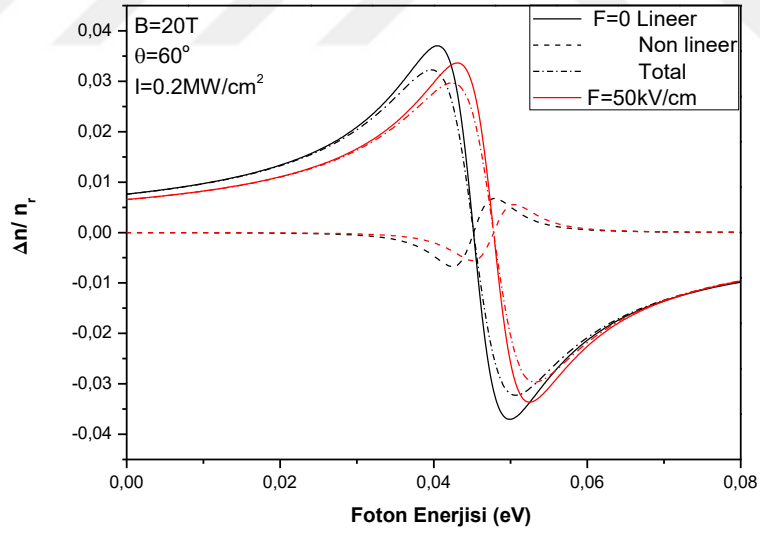
Şekil 5. 30 $F=0$ ve $F=50kV/cm$ iken $B=15T$, $\theta = 60^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değışimleri.



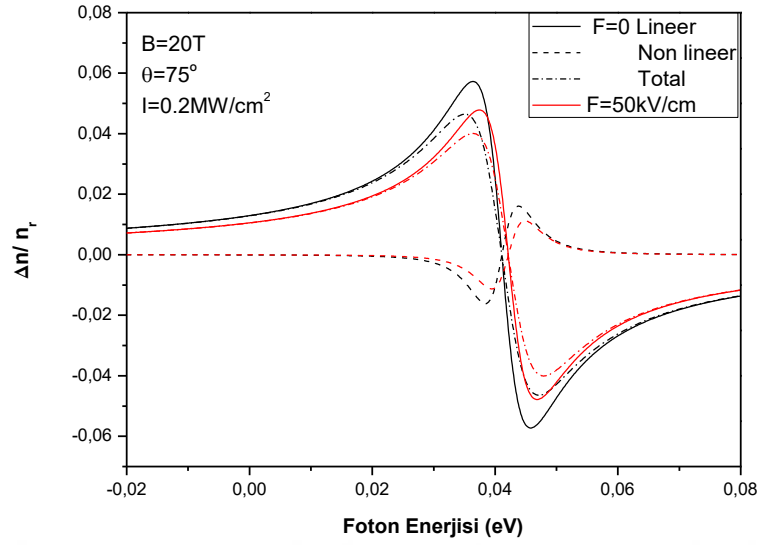
Şekil 5. 31 $F=0$ ve $F=50kV/cm$ iken $B=15T$, $\theta = 75^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değışimleri.



Şekil 5. 32 $F=0$ ve $F=50kV/cm$ iken $B=20T$, $\theta = 45^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değışimleri.



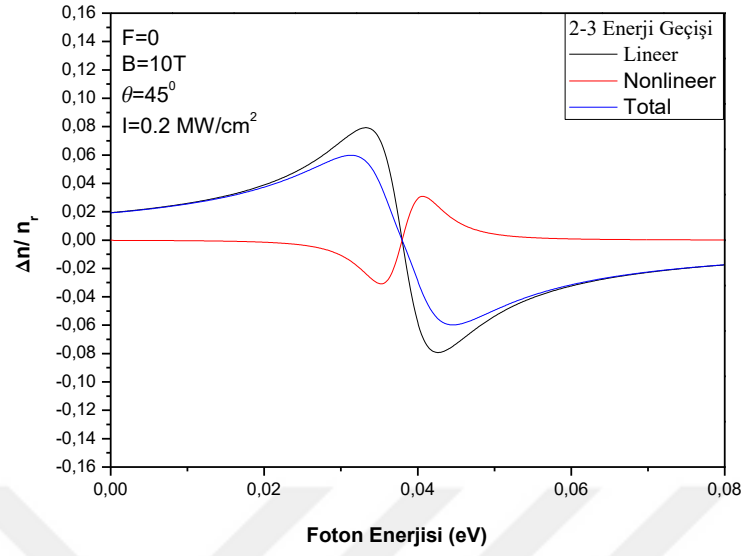
Şekil 5. 33 $F=0$ ve $F=50kV/cm$ iken $B=20T$, $\theta = 60^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değışimleri.



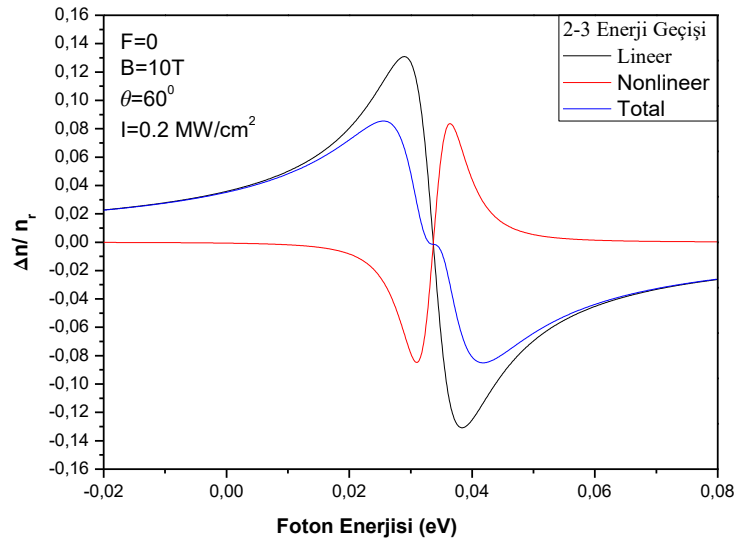
Şekil 5. 34 $F=0$ ve $F=50\text{kV/cm}$ iken $B=20\text{T}$, $\theta = 75^\circ$ için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.

Şekil 5.26 – şekil 5.34’de $F=50\text{kV/cm}$ değerinde elektrik alanın alansız duruma göre kıyaslandığı ve manyetik alanın x' eksenine ile yapmış olduğu farklı θ açılara göre kırılma indisinin foton enerjisine karşılık grafikleri çizilmiştir. Tüm manyetik alan değerlerinde genel olarak açı değeri 45° ’den 60° ’ye arttığında kırılma indisi grafiklerinde foton enerjisi önce artarak sağa (maviye) doğru sonra 75° ’de azalarak sola (kırmızıya) doğru kayar. Bunun sebebi elektrik alanın büyüyen değerlerinde, 45° ’den 60° ’ye artan açı değerleri ile ΔE enerji farklarını artırmasından kaynaklanmaktadır. 75° ’de görülen durum ise ΔE enerji farklarını azalmasından kaynaklanmaktadır. Şekil (5.26)’dan görüldüğü gibi, 45° ’de elektrik alan kırılma indisini alansız durumdakine göre daha büyük enerji değerine kaydırmaktayken Şekil (5.27)’de 60° ’de elektrik alanı uygulandığında hesaplanan kırılma indisi değerleri çakışmıştır. Açının 75° ’ye çıkarıldığı durumda (Şekil (5.28)) elektrik alanı uygulandığı durumun enerjisi alansız duruma göre daha küçük enerjiye kaymıştır. Şekil (5.26, 5.29 ve 5.32)’de görüldüğü gibi 45° için manyetik alanın artışı alansız ve alanlı durumdaki kırılma indisi enerji değerini tersine çevirmektedir. Lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisinin pik yükseklikleri alansız olanlar için alanlı duruma göre daha büyük değerlere sahipken özellikle 75° için her iki kırılma indisi pik yükseklikleri daha büyük değerlere yükselmektedir.

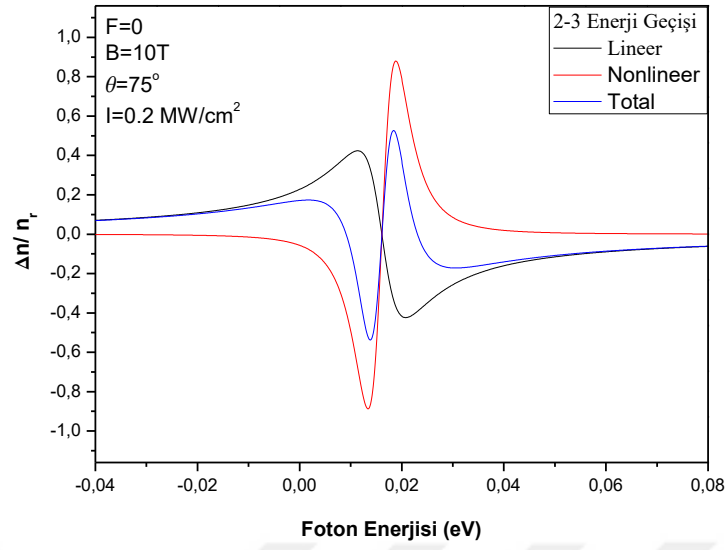
2-3 enerji geçişi F=0 iken;



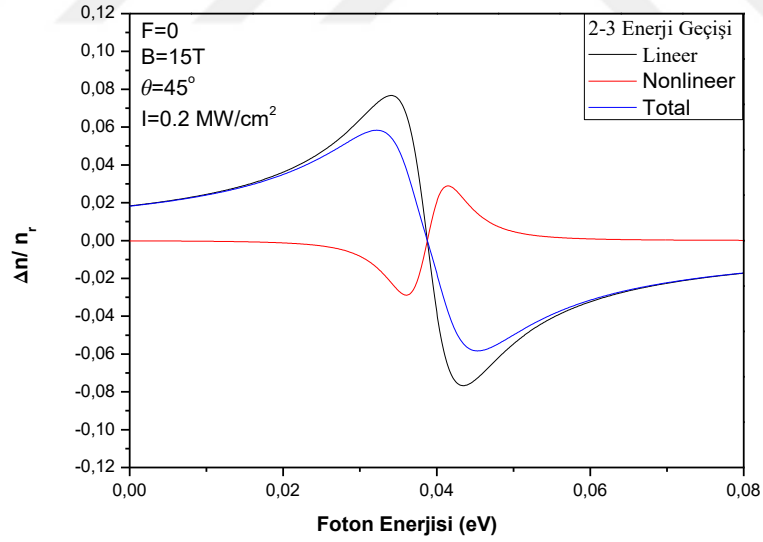
Şekil 5. 35 $B=10T$, $F=0$, $\theta = 45^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



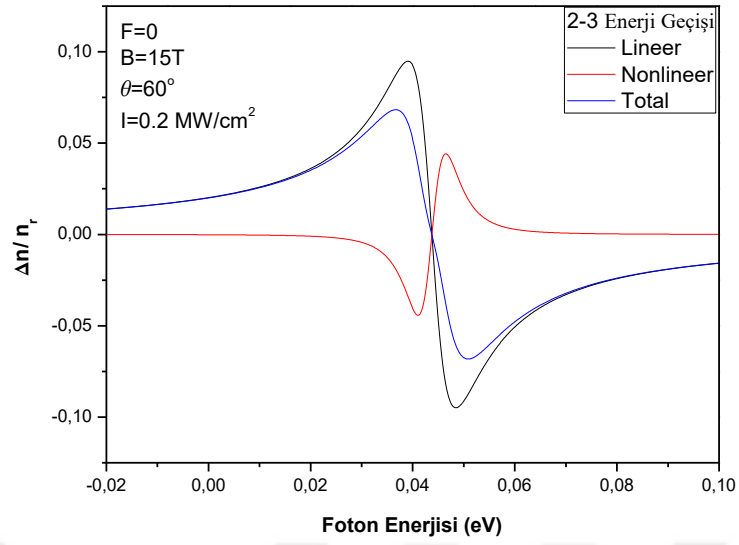
Şekil 5. 36 $B=10T$, $F=0$, $\theta = 60^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



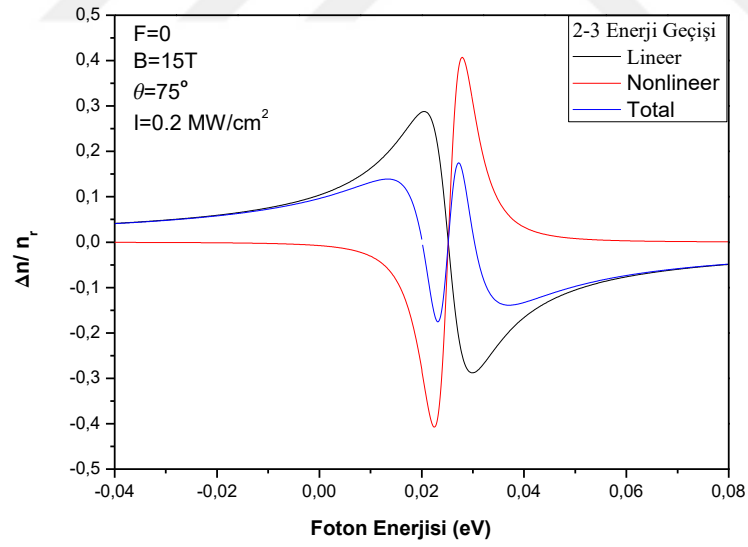
Şekil 5. 37 $B=10T$, $F=0$, $\theta = 75^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



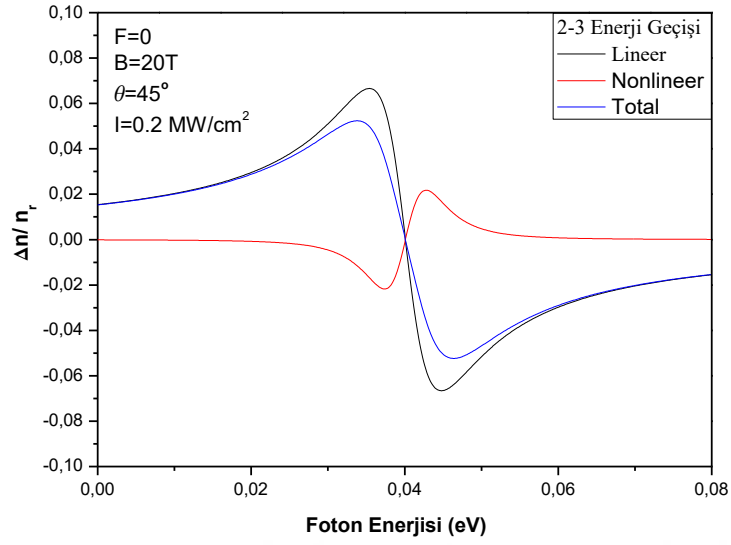
Şekil 5. 38 $B=15T$, $F=0$, $\theta = 45^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



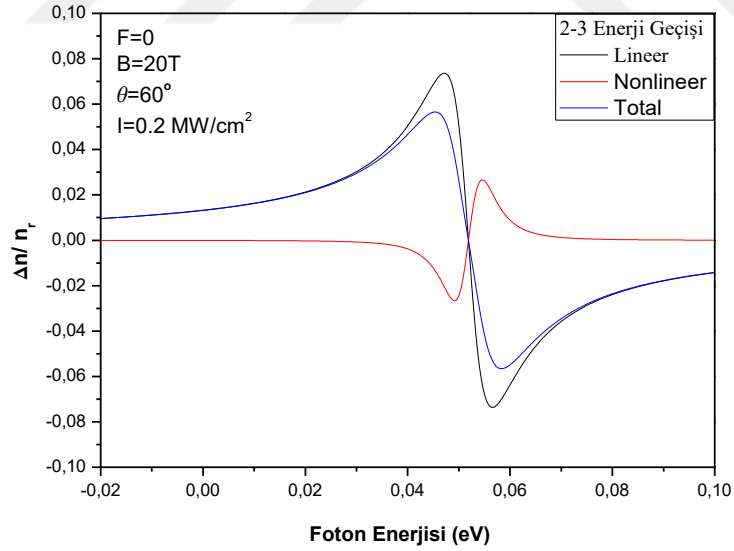
Şekil 5. 39 $B=15T$, $F=0$, $\theta = 60^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



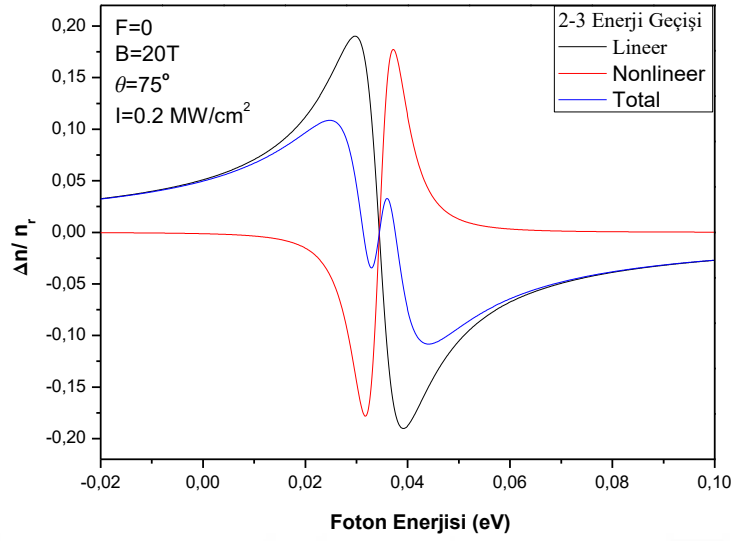
Şekil 5. 40 $B=15T$, $F=0$, $\theta = 75^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



Şekil 5. 41 $B=20T$, $F=0$, $\theta = 45^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



Şekil 5. 42 $B=20T$, $F=0$, $\theta = 60^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.

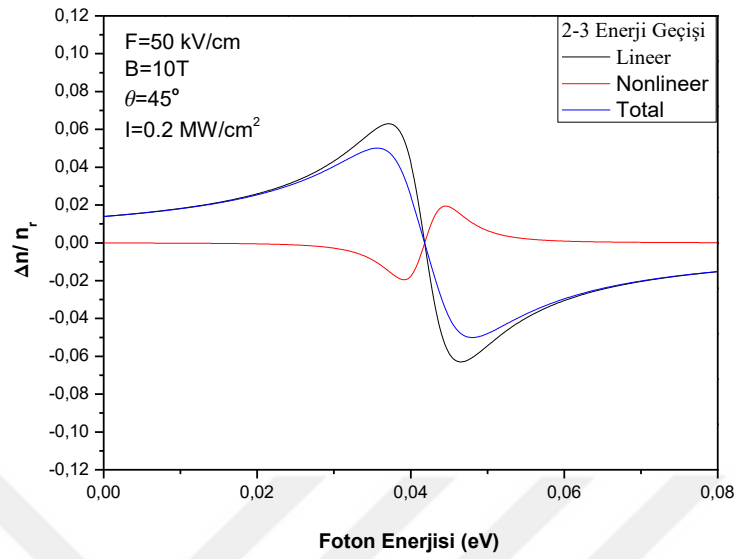


Şekil 5. 43 $B=20T$, $F=0$, $\theta = 75^0$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.

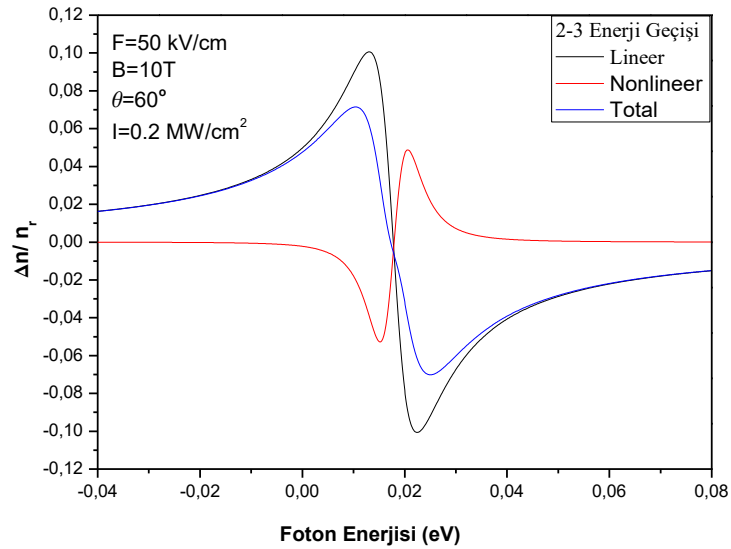
Şekil 5.35 – şekil 5.37 manyetik alanın x' eksenine ile yapmış olduğu θ açısına göre üç kuyulu kuantum sisteminin 2-3 enerji geçişi için kırılma indisinin foton enerjisine karşılık grafikleri çizilmiştir. $B=10T$ değerinde artan θ açısıyla lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisi grafiklerinde foton enerjisi azalarak sola (kırmızıya) doğru kayar. Bunun sebebi eğiklik açısının artması ile 2. Ve 3. Enerji düzeyleri arasındaki ΔE farkının azalmasıdır. Artan açı değerleriyle Toplam kırılma indisinin pik noktalarının arttığı görülür.

Şekil 5.38 – şekil 5.43 $B=15 T$ ve $B=20 T$ değerleri için manyetik alanın x' eksenine ile yapmış olduğu θ açısına göre üç kuyulu kuantum sisteminin 2-3 enerji geçişi için kırılma indisinin foton enerjisine karşılık grafikleri çizilmiştir. Artan θ açısıyla lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisi grafiklerinde foton enerjisi önce artarak sağa (maviye) sonrada azalarak sola (kırmızıya) doğru kayar. Bunun sebebi artan açı değerleri ile ΔE enerji farklarının önce artması sonra azalmasından kaynaklanmaktadır. Artan açı değerleriyle toplam kırılma indisinin pik yüksekliklerinin de arttığı görülür. Ayrıca, tüm manyetik alan değerleri için 75^0 de lineer olmayan kırılma indislerinin negatif yönde artması ile toplam kırılma indisi grafiklerinde negatif bölge pikleri oluşmaktadır.

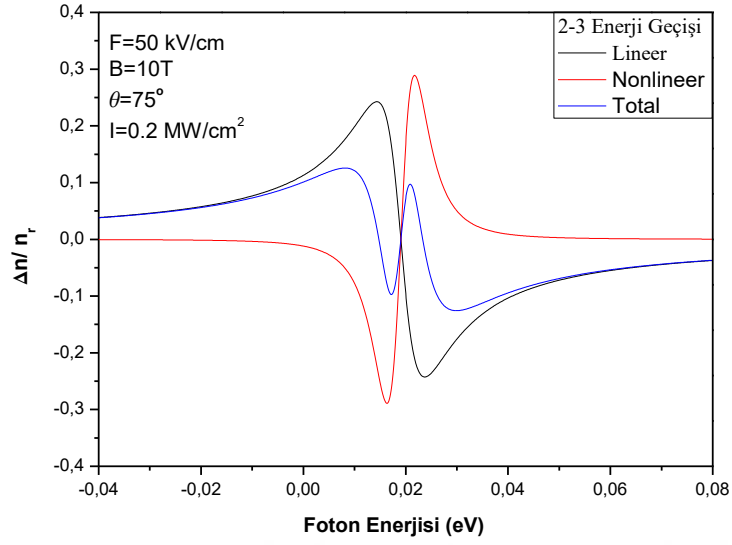
2-3 enerji geçişi $F=50k V/cm$ iken;



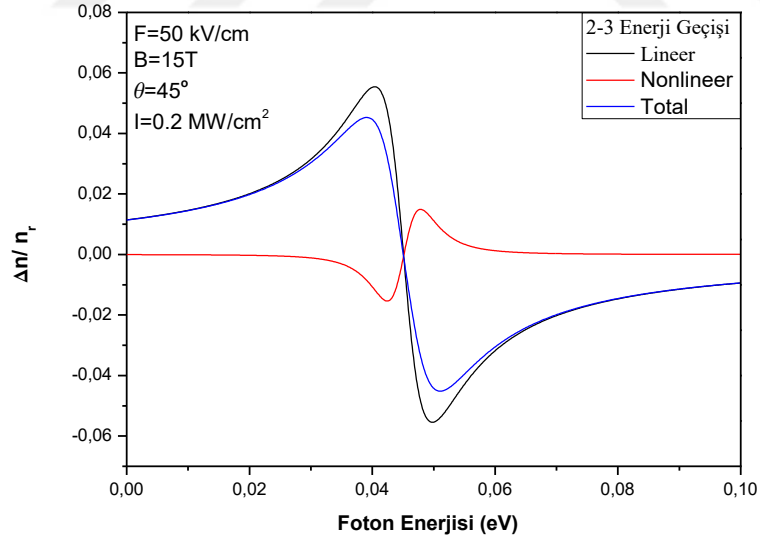
Şekil 5. 44 $B=10T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 45^0$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



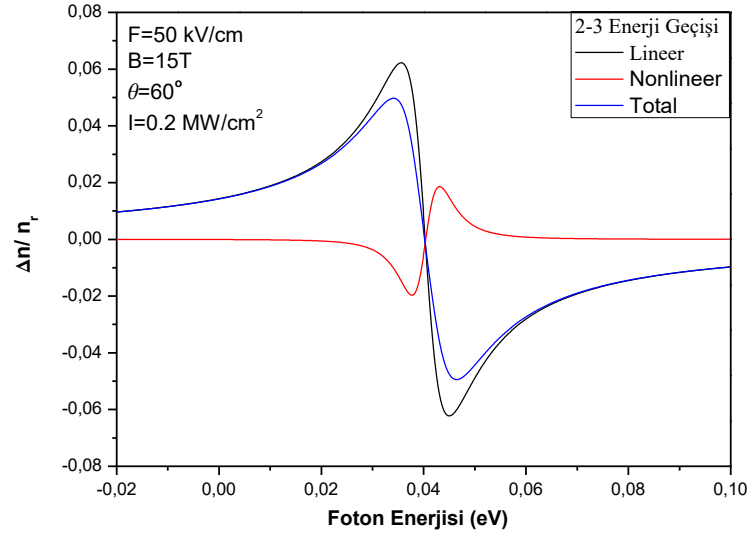
Şekil 5. 45 $B=10T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 60^0$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



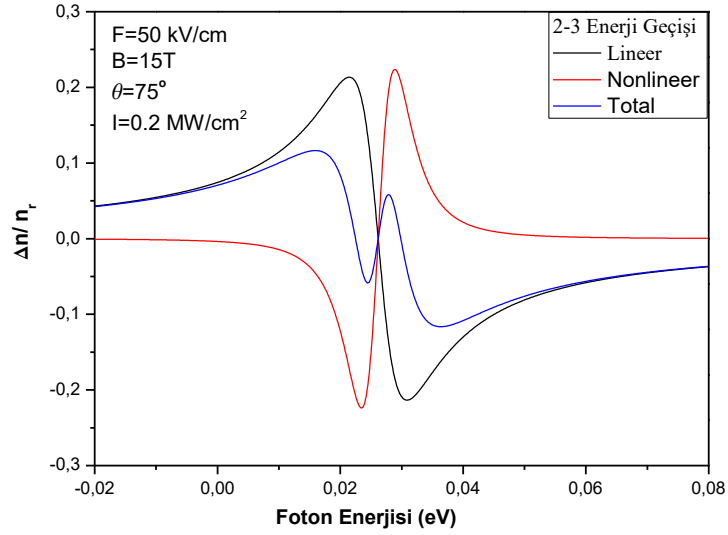
Şekil 5. 46 $B=10 \text{ T}$, $F=50 \text{ kV/cm}$, $\theta = 75^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



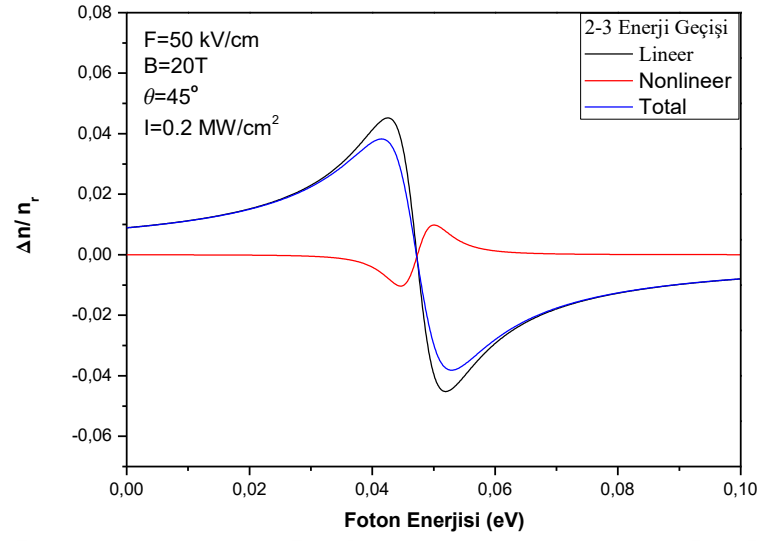
Şekil 5. 47 $B=15 \text{ T}$, $F=50 \text{ kV/cm}$, $\theta = 45^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



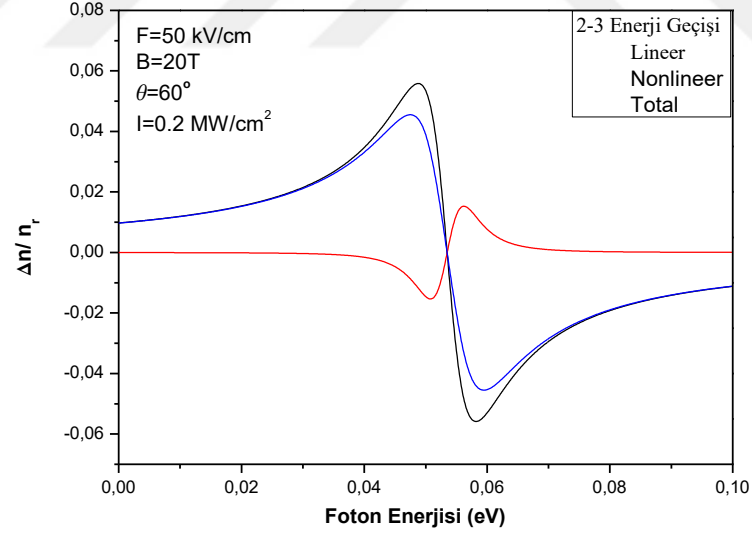
Şekil 5. 48 $B=15T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 60^0$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



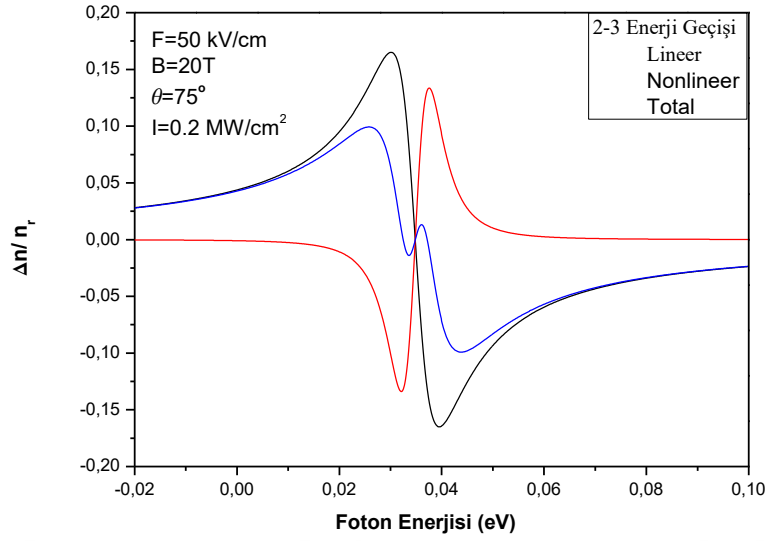
Şekil 5. 49 $B=15T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 75^0$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



Şekil 5. 50 $B=20$ T, $F=50$ kV/cm, $\theta = 45^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



Şekil 5. 51 $B=20$ T, $F=50$ kV/cm, $\theta = 60^\circ$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.

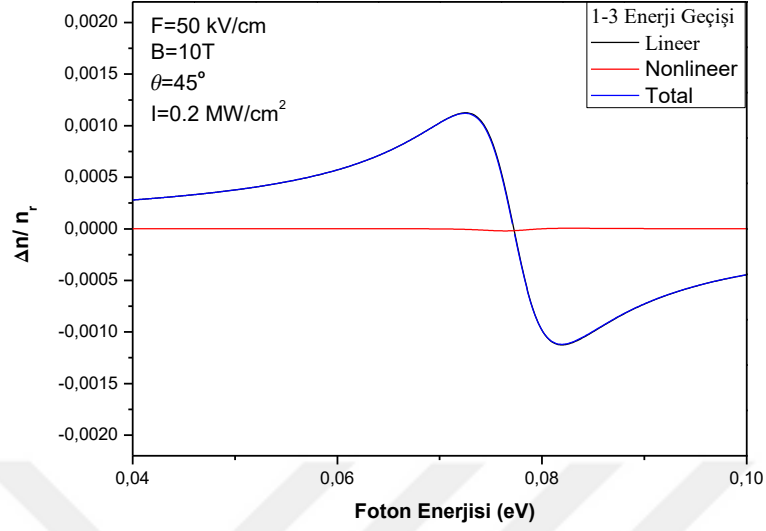


Şekil 5. 52 $B=20T$, $F=50kV/cm$, $\theta = 75^0$ iken 2-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.

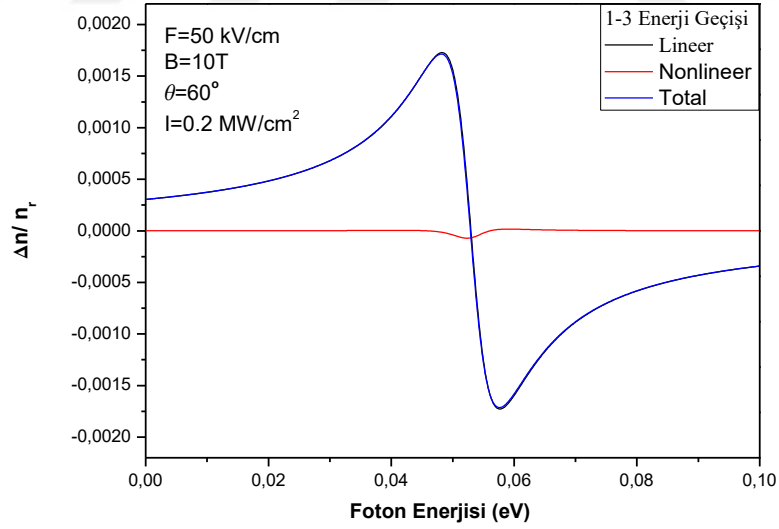
Şekil 5.44 – şekil 5.49 manyetik alanın x' eksenine ile yapmış olduğu θ açısına göre üç kuyulu kuantum sisteminin 2-3 enerji geçişi için kırılma indisinin foton enerjisine karşılık grafikleri çizilmiştir. Artan θ açısıyla lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisi grafiklerinde foton enerjisi azalarak sola (kırmızıya) doğru kayar. Bunun sebebi artan açı değerleri ile ΔE enerji farklarının azalmasından kaynaklanmaktadır. Artan açı değerleriyle toplam kırılma indisinin pik yüksekliklerinin arttığı, 75^0 için toplam kırılma indisinin lineer olmayan terimin lineer terimle kıyaslanabilir ölçüde büyümesinden dolayı azaldığı dikkat çekmektedir.

Şekil 5.50 – şekil 5.52 $B=20 T$ için manyetik alanın x' eksenine ile yapmış olduğu θ açısına göre üç kuyulu kuantum sisteminin 2-3 enerji geçişi için kırılma indisinin foton enerjisine karşılık grafikleri çizilmiştir. Artan θ açısıyla lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisi grafiklerinde foton enerjisi önce artarak sağa (maviye) sonrada azalarak sola (kırmızıya) doğru kayar. Manyetik alanın bu değerinde 2. ve 3. enerji düzeyi arasındaki fark küçük açı değerlerinde küçük iken açının 75^0 değerine doğru enerji farklarının artmasından kaynaklanmaktadır. Lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisinin pik yüksekliklerinin de arttığı görülür.

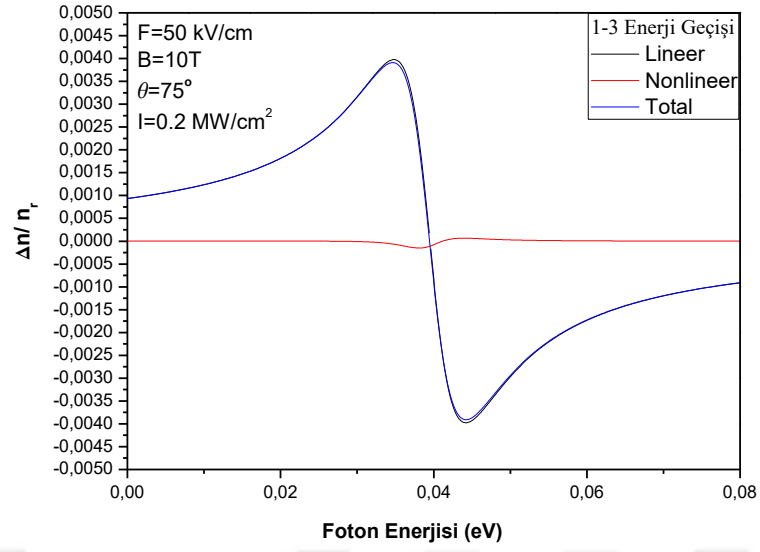
1-3 enerji geçişi F=50kV/cm



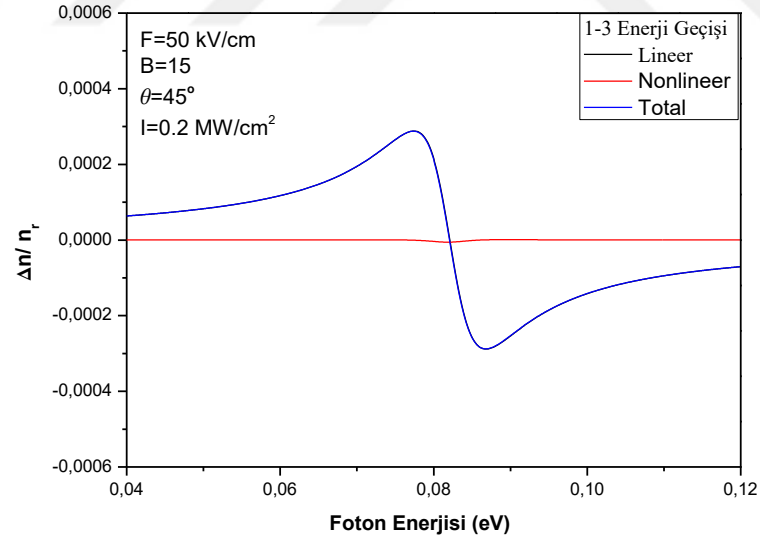
Şekil 5. 53 $B=10$ T, $F=50$ kV/cm, $\theta = 45^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



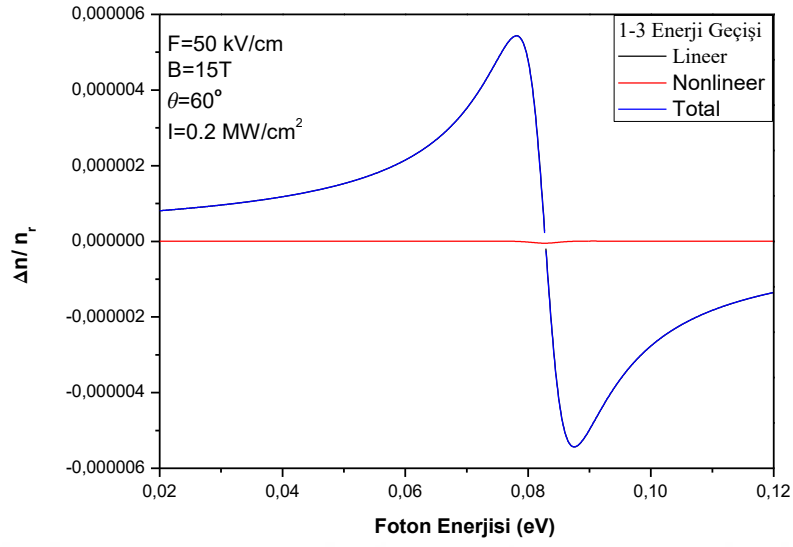
Şekil 5. 54 $B=10$ T, $F=50$ kV/cm, $\theta = 60^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



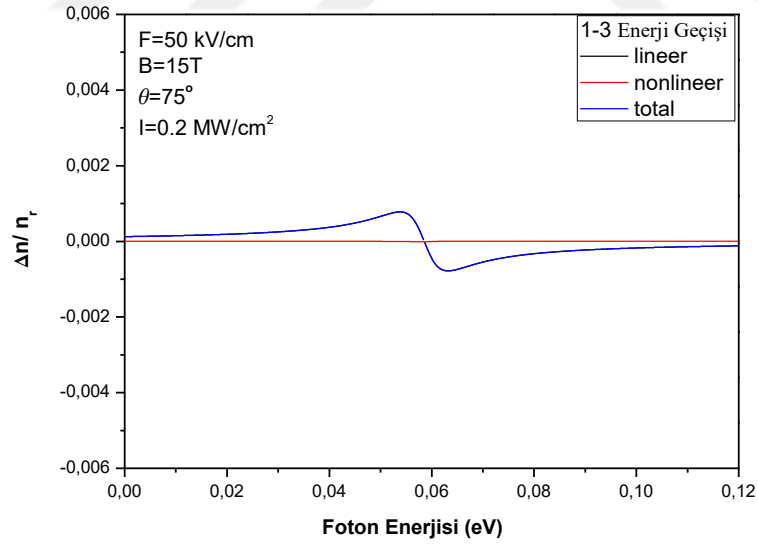
Şekil 5. 55 $B=10$ T, $F=50$ kV/cm, $\theta = 75^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



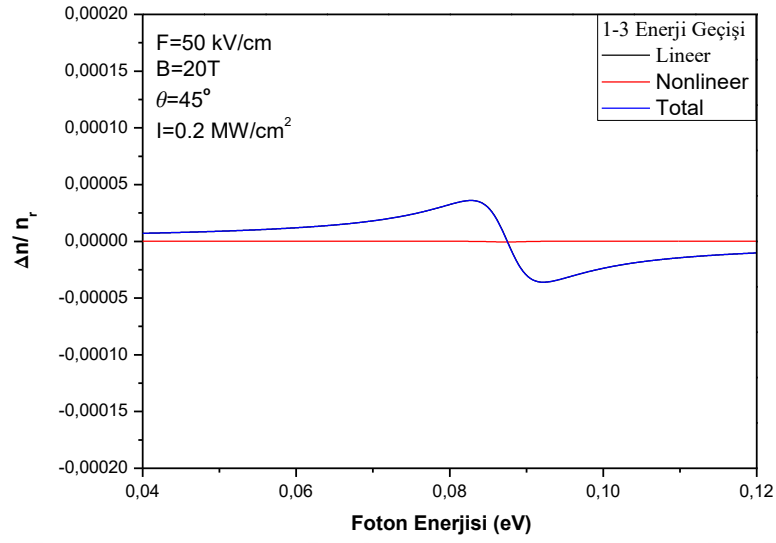
Şekil 5. 56 $B=15$ T, $F=50$ kV/cm, $\theta = 45^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



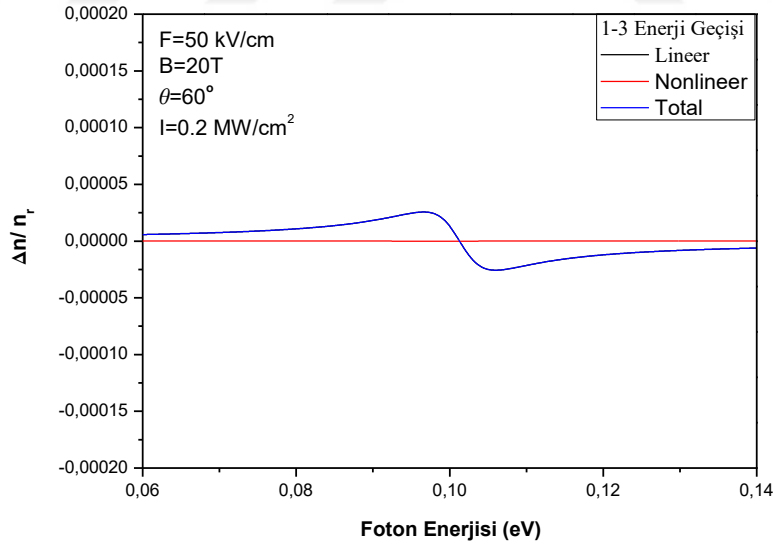
Şekil 5. 57 $B=15$ T, $F=50$ kV/cm, $\theta = 60^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



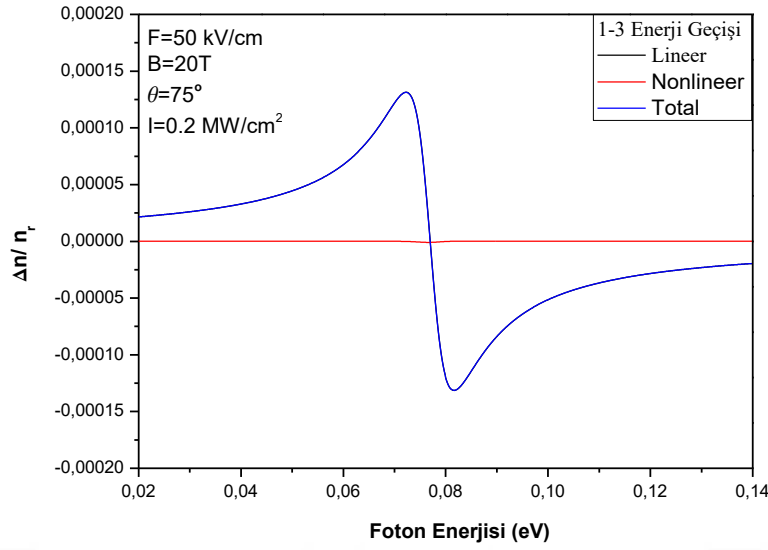
Şekil 5. 58 $B=15$ T, $F=50$ kV/cm, $\theta = 75^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



Şekil 5. 59 $B=20$ T, $F=50$ kV/cm, $\theta = 45^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



Şekil 5. 60 $B=20$ T, $F=50$ kV/cm, $\theta = 60^\circ$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.



Şekil 5. 61 B=20T, F=50kV/cm, $\theta = 75^0$ iken 1-3 elektronik enerji geçişi için foton enerjisinin fonksiyonu olarak kırılma indisi değişimleri.

Şekil 5.53 – şekil 5.55’de B=10 T’da manyetik alanın x' eksenine ile yapılmış olduğu θ açısına göre üç kuyulu kuantum sisteminin 1-3 enerji geçişi için kırılma indisinin foton enerjisine karşılık grafikleri çizilmiştir. Artan θ açısıyla lineer ve toplam kırılma indisi grafiklerinde foton enerjisi azalarak sola (kırmızıya) doğru kayar. Bunun sebebi artan açı değerleri ile ΔE enerji farklarının azalmasından kaynaklanmaktadır. Lineer ve toplam kırılma indisinin pik yüksekliklerinin arttığı görülür.

Şekil 5.56 – şekil 5.58’de B=15 T da manyetik alanın x' eksenine ile yapılmış olduğu θ açısına göre üç kuyulu kuantum sisteminin 1-3 enerji geçişi için kırılma indisinin foton enerjisine karşılık grafikleri çizilmiştir. Artan θ açısıyla lineer ve toplam kırılma indisi grafiklerinde foton enerjisi azalarak sola (kırmızıya) doğru kayar. Bunun sebebi artan açı değerleri ile ΔE enerji farklarının azalmasından kaynaklanmaktadır. Lineer ve toplam kırılma indisinin pik yüksekliklerinin açı ile önce azaldığı sonra arttığı görülür.

Şekil 5.59 – şekil 5.61’de B=20 T değeri için manyetik alanın x' eksenine ile yapılmış olduğu θ açısına göre üç kuyulu kuantum sisteminin 1-3 enerji geçişi için kırılma indisinin foton enerjisine karşılık grafikleri çizilmiştir. Artan θ açısıyla lineer ve toplam kırılma indisi grafiklerinde foton enerjisi önce artarak sağa (maviye) sonra

azalarak sola (kırmızıya) doğru kayar. Lineer ve toplam kırılma indisinin pik yüksekliklerinin önce azaldığı sonra arttığı görülür.

Şekil 5.53 – şekil 5.61’grafiklerinden görüldüğü gibi lineer olmayan kırılma indisi yok denecek kadar azdır ve lineer ve toplam kırılma indislerinin pik noktaları çakışıktır.

1→3 enerji geçişlerinde $F=0$ iken izinli olmadığı için herhangi bir inceleme yapılamaz. Bunun nedeni simetrik kuantum sistemlerinde dipol matris elemanı olmamasıdır. Çünkü enerji düzeylerinin zarf fonksiyonları aynı paritelidir. Bu geçişlerin izinli olabilmesi için elektrik alan uygulanır ya da asimetrik bir potansiyel tanımlanarak sistemin simetrisi bozulur ve böylesi asimetrik kuantum sistemlerinde normalde yasaklı olan enerji geçişleri izinli hale gelir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada üç kuantum kuyusundan oluşan $GaAs/Ga_{1-x}Al_xAs$ yarıiletken heteroyapıya, z büyütme doğrultusunda elektrik alan ve x eksenine θ açısı yapacak şekilde eğik manyetik alan uygulandı. Sistemi tanımlayan Schrödinger denklemi ortogonal dönüşüm uygulanarak bileşenlerine ayrılabilir hale getirildi ve analitik çözümleri ile enerji özdeğerleri bulundu. Ayrıca; elektrik ve eğik manyetik alanların ve bunların değişimiyle de kuyu parametrelerinin, enerji özdeğerleri ve bandıç elektronik geçişleri incelendi.

Manyetik alan, elektrik alan ve θ açısı değerlerine bağlı olarak kuyu parametrelerinin değiştiği gözlemlendi. Manyetik alan değerleri arttıkça kuyu genişliği ve bariyer genişliği artarken potansiyel yükseklik azalır. θ açısı değeri arttıkça kuyu genişliği, bariyer genişliği ve potansiyel yükseklik azalır. Kuyu parametreleri elektrik alandan bağımsızdır. Elektrik alan uygulanması ile sistemin simetrikliği bozulur ve kuyu merkezi 2β kadar sağa kayar. Üç kuantum kuyu sisteminin ilk altı elektronik enerji düzeylerinin yörünge merkezine göre değişim grafikleri incelenmiştir.

Üç kuantum kuyusundan oluşan sistemde kırılma indisi hesaplamaları ilave edilerek 0.2 MW/cm^2 ışık şiddeti altında (1-2), (2-3), (1-3) elektronik enerji geçişleri için lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisi değişimleri incelenmiştir. Manyetik alan, elektrik alan ve θ açısı değerlerindeki değişimlere göre ΔE değeri artar veya azalır. ΔE değeri arttıkça foton enerjisinin sağa (maviye) ve ΔE değeri azaldıkça foton enerjisinin sola (kırmızıya) kaydığı görülmüştür.

Simetrik kuantum sisteminde dipol matris elemanı bulunmadığı için 1-3 geçişi izinli değildir. Bu geçişi izinli hale getirebilmek için elektrik alan uygulanmalı ya da asimetrik kuantum sistemlerde incelenmelidir. Bu çalışmamızda $F=50 \text{ kV/cm}$ elektrik alan altında 1-3 elektronik enerji geçişleri için lineer, lineer olmayan ve toplam kırılma indisi değişimleri incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlara göre kırılma indisi değişiminin kuyu boyutlarına, manyetik alan ve açısı değerlerine duyarlı olduğunu görülmektedir. Manyetik alan kuvvetinin veya açısı değerlerinin değiştirilmesi ile farklı numunelerin büyütülmesine gerek kalmadan mavi veya kırmızı bir kayma elde edilebilir. Bu, elektronların bantlar arası geçişine dayanan çeşitli cihaz uygulamalarında da yeni bir serbestlik derecesi sağlar.

KAYNAKLAR

- [1] **Karabulut İ.** (2008) Asimetrik Kuantum Kuyu Yapılarının Lineer olmayan Optik Özelliklerinin İncelenmesi, (Doktora Tezi). Konya.
- [2] **Dingle, R. Wiegmann, W. Henry, C.**, 1974, Quantum states of confined carriers in very thin Al_xGa_{1-x}As/GaAs/Al_xGa_{1-x}As heterostructures, *Physical Review Letters*, 33, 827.
- [3] **West, L.C., Eglash, S.J.** 1985, First observation of an extremely large-dipole infrared transition within the conduction band of a GaAs quantum well, *Applied Physics Letters* 46, 1156.
- [4] **Mosely, T.S., Belyanin, A., Gmachl, C., Sivco, D.L., Peabody, M.L., Cho, A.Y.** Third harmonic generation in a quantum cascade laser with monolithically integrated resonant optical nonlinearity. *Optics Express* 12-2972 (2004).
- [5] **Amca R.** (2000) Elektrik ve eğik manyetik alan altındaki süperörgülerde elektronik enerji düzeyleri, (Doktora Tezi). Sivas.
- [6] **C.E.T. Goncalvez da silva, E.E. Mendez**, Phys. Rev. B 38,3994 (1998).
- [7] **P.A. Shutz ve C. Tejedor**, Phys. Rev. B 41,3053 (1990).
- [8] J. C. Maan, in Two-dimensional Systems. Heterostructures and Superlattices, Vol 53, in Solid States Science edited by Gbauer, F. Kuchar ve H. Heinrich (Springer, Berlin, 1984).
- [9] **C.Weisbuch ve B. Vinter**, in Quantum Semiconductor Structures, (Academic Press, New York, 1991).
- [10] **İ.Sökmen, H.Sarı, S.Elagöz, Y.Ergün, ve S.Erzin**, Superlatt. Microstruct. 17,3 (1995).
- [11] **Harrison, P.** (2005), Quantum Wells, Wires and Dots, *Wiley-İnterscience*, West Sussex-England, 243.
- [12] **L.Esaki and R.Tsu** (1969) "Superlattices and Negative Conductivity in Semiconductors" IBM Res.Note, RC-2414.
- [13] **Üstün, T.** (2011). Kuantum Nokta Temelli Bellek Yapılara Kuantum Noktalarının Elektronik Yapısının Derin Seviye Geçiş Spektroskopisi ile Belirlenmesi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (Yüksek Lisans Tezi). Ankara.
- [14] **Akçay, N.** (2008). Kuantum nokta temelli bellek aygıtlar. İstanbul Üniversitesi, (Doktora tezi). İstanbul.
- [15] **Aydın, F.** (2012). Yarı-Parabolik Kuantum Kuyusunda Safsızlık Düzeyleri ve Özkutulanma. Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, (Yüksek Lisans Tezi). Sivas.
- [16] **Jaros, M.** (1989). Physics and Applications of Semiconductor Heterostructures Oxford University Press. New York.
- [17] **Casey, H. C., Panish, M. B.** (1978). Heterostructure Lasers", Academic, New York,193.
- [18] **Ayşe EROL**, (2002). Yüzey Işıması Yapan Düşük Boyutlu Yapılarda Bragg Yansıma Olaylarının İncelenmesi., İstanbul Üniversitesi, (doktora tezi)
- [19] **Razeghi, M., 2010**, Technology of Quantum Devices, *Springer*, Evanston- USA, 271-321.
- [20] **Schubert, E. F. 2003**, Quantum Wells, *Rensselaer Polytechnic Institute*, USA, 15.
- [21] **K. Von Klitzing, G. Dorda ve M. Pepper**, Phys. Rev. Lett 45,494 (1980).
- [22] **D.C. Tsui ve A.C. Gossard**, Appl. Phys. Rev. Lett 38,550 (1981).
- [23] **D.C. Tsui ve H.L. Störmer ve A.C. Gossard**, Phys. Rev. Lett 48,1559 (1982).
- [24] **M.P.Stoma ve S.D. Sarma**, Phys. Rev. B.40,14 (1989).
- [25] **S.J. Lee, M.J. Park, G. Ihm, M.L. Falk, S.K. Noh, T.W. Kim ve B.D. Choe**, physica B 184,318 (1993).
- [26] **D.M. Mitronovic, V. Milanovic ve Z. Ikonic**, Phys. Rev. B 54,11 (1996).

- [27] **Mosely, T.S., Belyanin, A., Gmachl, C., Sivco, D.L., Peabody, M.L., Cho, A.Y.** Third harmonic generation in a quantum cascade laser with monolithically integrated resonant optical nonlinearity. *Optics Express* 12-2972 (2004).
- [28] **M.Abramowitz ve I.A. Stegun,** Handbook of Mathematical Functions, 503,(Dover New York, 1964).
- [29] **Karabulut İ.** (2008) Asimetrik Kuantum Kuyu Yapılarının Lineer olmayan Optik Özelliklerinin İncelenmesi, (Doktora Tezi). Konya.
- [30] **D.C. Tsui ve A.C. Gossard,** *Appl. Phys. Rev. Lett* 38,550 (1981).
- [31] **D.C. Tsui ve H.L. Störmer ve A.C. Gossard,** *Phys. Rev. Lett* 48,1559 (1982).
- [32] **Hecht, E., Optics 1nd ed.,** (1998) Adelphi University, Addison Wesley , United States , 109-113.
- [33] **Aygün, E., Zengin, D. M.,** (1994) “Kuantum Fiziği 3nd ed ”, *Bilim Yayın Evi*, Ankara, 20.
- [34] **D. Ahn, S. L. Chuang,** (1987) *IEEE J. Quantum Electron.* 23 2196.
- [35] **D. Ahn, S. L. Chuang,** (1987) *J.Appl. Phys.* 62 3052.
- [36] **Li Zhang,** (2004) *Opt. Quantum Electron.* 36 665-673.
- [37] **Li Zhang,** (2005) *Superlattices and Microstructures* 37 261-272.
- [38] **I. Karabulut, S. Unlu, H. Safak** (2005) *Phys. Status Solidi B* 242 2902.
- [39] **I. Karabulut, U. Atav, H. Safak, M. Tomak,** (2007) *Eur.Phys. J. B* 55 283-288.
- [40] **Bin Chen, Kang-Xian Guo, Rui Zhen Wang, Zhi Hai Zhang, Zuo Lian Liu,** (2009) *Solid State Commun.*149 310-314.
- [41] **A. Keshavarz, M.J. Karimi,** (2010) *Phys.Lett. A* 374 2675-2680.
- [42] **Yusuf Yakar, Bekir Cakır, Ayhan Ozmen.** (2010) *Opt.Commun.* 283 1795-1800.
- [43] **R. Khordad, S.K. Khaneghah,** (2011) *Phys. Status Solidi B* 248 243-249.
- [44] **E.M. Goldys, J.J. Shi,** (1998) *Phys. Status Solidi B* 210 237.
- [45] **C.H. Liu, B.R. Xu,** (2008) *Phys. Lett. A* 372 888.
- [46] **G.H. Wang, K.X. Guo,** (2005) *Physica E* 28 14.
- [47] **U.Yesilgul, F. Ungan, E. Kasapoglu, H. Sarı, I. Sökmen** (2011) *Superlattices and Microstructures* 50(4) 400-410.
- [48] **R.Özbakır,** (2018) *Can. J. Phys.* **96, (9),** 999–1003 (2018)
- [49] **Karabulut İ.** (2008) Asimetrik Kuantum Kuyu Yapılarının Lineer olmayan Optik Özelliklerinin İncelenmesi, (Doktora Tezi). Konya.

ÖZGEÇMİŞ



Kişisel bilgiler

Adı Soyadı Faruk BAŞPINAR
Doğum Yeri ve Tarihi Sivas, 08.07.1986
Medeni Hali Evli
Yabancı Dil İngilizce
İletişim Adresi Cami Kebir Mh. Hoca Ahmet Yesevi Cad.
NO:11 Ziyabey Apt. Kat:2 No:8
SİVAS/MERKEZ
E-posta Adresi frkbspnr@gmail.com

Eğitim ve Akademik Durumu

Lise Sivas Lisesi, 2003.
Lisans Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, 2014.
Yüksek Lisans Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, 2017.

İş Tecrübesi

Halk Eğitim Merkezi Fizik Öğretmeni (Ücrt. Öğretmen), 2015 – 2016
Proyap İnş. A.Ş. Bilgisayar Programcısı (cbs personeli), 2016 -

Kongreler ve Bildiriler

Uluslararası Ozbakır R., Başpınar F., Linear and Nonlinear Refractive Index Changes in Triple Quantum Wells Under The Tilted Magnetic Fields , International Black Sea Coastline Countries Symposium –II full text book ISBN-978-605-7695-29-1, July 20-22, 2019 Samsun, TURKEY. (412-418)