2. 4. OPTOELEKTRONİK GRUBU

2003 Nobel Konferansında ünlü fizikçi V.Ginzburg fiziğin şu anda olan en önemli problemlerini göstermiştir. Bu 30 problemden 14'ü katıhal fiziği ile ilgildir. Grubumuzun çalıştığı katmanlı yapıdaki kristaller Ginzburg'un listesinde özetlenen neredeyse bütün katıhal problemleri ile ilgili umut verici veriler ortaya koymaktadır.. Ginzburg'un kaydettiği en önemli problemlerden 5'i gurubumuzda araştırılan problemlerdir. Bu problemler aşağıda sıralanmıştır:

İki boyutlu elektron gazı, fotonik kristaller, negatif lineer genişleyen malzemeler, ferroelektirikler, ferrotoroikler, nonlinear fizik (kaos), vb.

<u>İki boyutlu elektron gazı</u>

Yarıiletkenlerdeki elektronlar ve deşikler (holler) uyarılmalarından sonra, birbirleriyle etkileşime girerek eksitonları oluştururlar. Eksitonlara hidrojene benzer (hidrojenimsi) bir yapı olarak bakabiliriz. Çünkü deşik burada zıt işaretli yüke sahip olup çekirdeğin yerini tutmaktadır. Ancak hidrojen atomundan farklı olarak bu iki parçaçık dielektrik bir ortamda (duygunluk katsayısı $\varepsilon \approx 10$) çevresi ile etkileşime girer. Parçacıkların etkin kütlesi $m_{eff} \approx 0{,}1 m_e$ civarında olduğundan dolayı eksitonların bağlanma enerjisi $E \approx 10^{-2}$ eV ve yarıçapları $a \approx 10^{-6}$ cm mertebesindedir. Dolayısıyla, yüksek yoğunluklu hidrojenimsi sistemler oluşturmak zor değildir. Gerçekten de, yüksek yoğunluklu bir eksiton gazının sağladığı $a^3 * n_{exc} \geq 1$ şartına bakarsak, görürüz ki, eksiton yoğunluğu $\approx 10^{18}$ cm^{-3} mertebesindedir (burada n_{exc} eksiton yoğunluğudur). Yüksek yoğunluklu hidrojenimsi gaz diye adlandırabileceğimiz bu tip eksiton sistemleri, yarıiletkenlerin optik uyarılmaları yoluyla kolayca elde edilebilir. Bu yoğunluktaki gerçek hidrojen gazını oluşturmak için ise milyonlarca atmosfer basınç gerekmektedir. Dolayısıyla, yüksek yoğunluklu elektron-deşik plazmasının özelliklerini çalışmak, yüksek yoğunluklu hidrojen gazı modelini geliştirmek [1] önemli olduğundan, problemin çözümü fiziğin katıhal dışındaki alanları için de önem kazanmaktadır. Bunun yanında problemin katıhal fiziğinin bakış açısından önemi ise ayrıca vurgulanmaya değerdir. Çünkü, bahsettiğimiz yoğunluklarda, elektron-deşik gaz plazması, yoğun hale

geçerek, elektron-deşik sıvısı olarak isimlendirilmesini gerektiren enterasan fiziksel özellikler göstermektedir [2-3]. Örneğin, teorik tahminlere göre, oluşan yapı süperiletken metal gibi davranmaktadır [4]. Bunun yanında, bu yapı çok iyi bir uyarılmış salınım (emission) kaynağıdır. Elektron-deşik sıvıları şimdiye kadar Si ve Ge'un yarıiletkenlerde gözlenmiş bulunmaktadır. Bu konudaki araştırmaların merkezindeki en temel problem, elektron-deşik sıvı yapısının süperiletkenliği ve süperakışkanlığıdır.

Yapı iki boyuta indirildiğinde bu problem daha da ilginç özellikler kazanmaktadır. Çünkü bu tip yapılar, teorik tahminlere göre, çok yüksek bağlanma enerjilerine sahip olacağından yukarıda kısaca açıklanan enteresan fiziksel özellikleri oda sıcaklığında dahi sergileyebilirler [5]. Diğer yandan, bu iki boyutlu yapıların yüksek teknolojiler kullanılmadan alınması mümkün görünmüyor. Bu durumda yine de katmanlı kristaller ilgi merkezinde olabilir. Onların kristal yapısı iki boyutlu elektron gazının elde edilmesi için doğal bir ortam olabilir.

Fotonik Kristaller

Fotonik ışık ve maddenin birbiriyle etkileşimi inceleyen bilim dalıdır. Son teknolojik gelişmeler bilgi depolama, haberleşme, bilgi giriş işlemleri için elektronlar yerine fotonların kullanılmasını öne çıkarıyor. Yapılan bilimsel tahminlere göre, fotonikte kullanabilen yeni teknik ve malzemeler teknolojik cihazların hemen hemen her tipinin uyumluluğunu, hızını ve gücünü çok yüksek oranda artıracaktır. Yani nanoelektronik entegre devrelerin optik yöntemlerle üretilebilmesi sonucu yeni nesil fotonik cihazların kullanıma girmesiyle bilgisayarların daha da hızlanması ve DVD' lerin bilgi saklama ve aktarma kapasitelerinin artması mümkün olacaktır. Diğer yandan fotonik teknolojisinin gelişiminin temel taşını fotonik kristaller oluşturacaktır [6-7].

Genel bir bakış açısıyla, fotonik kristalleri alışılagelmiş kristallerden ayıran en önemli fark bunların örgü periyotlarının normal kristallerin örgü periyotlarından defalarca büyük olmasıdır. Genellikle, bilinen kristal yapıların örgü parametreleri elektron gibi serbest taşıyıcıların dalga boyları mertebesinde olduğundan elektronlarla kırınım etkileri gözlenir ve gelen elektronlar kırınımın mertebesine göre farklı açılarda farklı şiddetlerde saçılırlar. Benzer etkiler fotonlarla da yapılabilir. Ancak bu kez fotonların dalga boyu mertebesinde kristal örgü parametresine gerek

olur. Bu örgüler yapay biçimde elde edilebilirler. Fotonlar için benzer etkileri sergileyecek bir süper örgü oluşturulduğunda fotonların kırınıma uğraması sonucunda (diğer bir deyişle fotonik kristal), kristalin boyutu sayısınca kırılma indisi periyodik olarak değişir. Yani örgü parametreleri ile etkin kırılma indisi arasında bir ilişki olur.

Fotonik kristallerin ilki ve en iyi bilineni alışageldiğimiz klasik kristal örgüdür ki, bu örgü uygun dalga boylu x-ışınları için bir fotonik kristal gibi davranır. Daha uzun dalga boylarına sahip ışınımlara benzer tepkileri verecek örgüleri oluşturabilmek için, ilgilendiğimiz dalga boyuna yakın periyotlara sahip örgü parametreli suni yapılar oluşturmalıdır. Bu ise ancak yeni gelişmekte olan nanoteknolojiler ile mümkündür. Bu teknolojiler gelişmeden önce bu konu makroskopik boyutta ele alınmış ve ilk yapılan suni fotonik kristal cm dalga boyu civarında seçilmiş ve ancak 1990'larda bu yapıların elektromanyetik dalgaya tepkisi araştırılmıştır. Çok daha düşük dalga boylarında (optik, görünür bölgede) çalışabilecek fotonik kristallerin yapımı ise daha büyük zorluklar içermektedir. Bu teknolojik zorlukları analiz etmeden önce, fotonik kristallerin geleceğin elektronik ve opto-elektronik sahasındaki önemine kısaca değinmek uygun olur.

Basitçe söylemek gerekirse, fotonik kristallerin çalışma prensibi çok iyi bilinmektedir. Bu prensipler, periyodik yapılardaki dalga hareketi, bant yapı hesapları gibi prensiplerdir. Diğer taraftan alışılagelmiş kristallerin elektron enerjileri için sergiledikleri bant yapıları hakkında bildiğimiz herşeyi, fotonik kristallerin bant yapılarına kolaylıkla uyarlayabiliriz [8]. Dolayısıyla, hakkında sahip olduğumuz bunca bilgi ışığında fotonik kristallerin, yarıiletkenler ve metallerin hemen yanında teknolojideki yerini almasına şaşırmamalıyız. Aynı zamanda fotonik kristallerin, diğer kristallerden farklı bazı fiziksel özelliklere sahip olduğunu söylemekte de fayda var. Örneğin, elektrik yük akımından kaynaklanan ısı yayılımı, bugünün elektroniğindeki en önemli problemlerden biridir. Bu problemin çözümü için yüksek sıcaklıklarda enerji kaybını sıfırlayan yarıiletken malzemelere ihtiyaç duyulmaktadır. Henüz böyle bir malzeme bilinmemektedir. Bu yüzden nispeten daha iyi sonuçlar veren fotonik kristallerin kullanılması bazı uygulamalarda bu problemin aşılmasını sağlayacaktır.

Fotonik kristallerin kullanımında bir diğer olgu, negatif kırılma indisine sahip metamateryallerin gerçekleştirilmesidir. Maxwell denklemlerine göre, ortam aynı anda

hem negatif dielektrik, hem de negatif manyetik alınganlığa (susceptibility) sahip olduğunda, negatif kırılma indisi mümkün olmaktadır. Bu durum geçtiğimiz son 10 yıl içerisinde gösterilmiştir [3,7,9]. Fotonik kristallerde, negatif kırılma indisiyle gözlemlenebilecek enteresan fiziksel olaylardan biri, klasik optiğin temel sınırlaması olan çözünürlük için difraksiyon limitinin, negatif kırıcı malzemeler için bulunmamasıdır. Bu özellikten faydalanarak mükemmel lensler [10,7] yapılabilir ki, bu lenslerin gerçekleştirilebilmesi şu anki modern optiğin ilk hedefleri arasındadır.

Fotonik kristal fiziğinin ve teknolojisinin şu anki hedefilerinden birisi de elektromanyetik spektrumun görünen bölgesinde ve hatta UV kısmında çalışan fotonik kristaller yapmak olduğu için, karşısına çıkan en önemli problem nanoyapıların periyodik bir şekilde dizilebilmesidir. Bu zorluğun, tabii fotonik kristaller (opal gibi) kullanılarak üstesinden gelinebileceği kabul edilmektedir. Fakat bu tip tabii fotonik kristallerin fazla çeşidinin olmadığını belirtmek gerekir. Bu açıdan, gurubumuzda çalışılan katmanlı yapıya sahip kristaller önem taşımaktadır. Bu tip kristallerde en az bir yönde (katlara dik) fotonik bir yapının oluşması mümkün olabilir. Böylece, nanoteknoloji yöntemleri kullanmadan, sadece kristal teknoloji kullanarak doğal fotonik kristallerin yapılması mümkün olabilir. Grubumuzun çalışmalarında bu tip sonuclar elde edilebilmiştir.

Negatif Isıl Genleşme

Sıvı ve katı malzemeler, birkaç istisna dışında, pozitif ısıl genleşme katsayısına sahiptir. Yani ısıtıldıkları zaman boyutları artar. Fakat negatif ısıl genleşme katsayılı yani ısıtıldığı zaman büzülen, soğutulduğu zaman genişleyen bazı malzemeler de vardır. Yakın zamanda oksit malzemelerin bir sınıfı olan ZrW_2O_8 tipindeki bileşiklerinin geniş bir sıcaklık aralığında ısıtıldıkları zaman büzüldükleri keşfedilmiştir ki bu birçok teknolojik kullanıma adaydır [11-12]. Bu tür maddeler katkılanarak oluşturdukları kompozit malzemelerde sağladıkları ısıl genleşme modifikasyonu (genleşme katsayısını istenen düzeye ayarlamak) sebebiyle optik aynalarda, elektronik devre tabanlarında, dişçilik malzemelerinde uygulama potansiyeline sahiptirler.

Kaydedilmesi gereken bir diğer nokta ise birçok malzemenin düşük sıcaklıklarda ve dar bir sıcaklık aralığında, tıpkı suyun 0 ^{o}C - 4 ^{o}C arasında

ısıtıldığında büzülmesi gibi, negatif ısıl genleşme (NTE: negative thermal expansion) göstermesidir. Diğer taraftan çoğunlukla NTE malzemenin sadece tek bir boyutunda gözlenebilmektedir. Bütün bunlar NTE gösteren malzemelerin kullanımını kısıtlamaktadır.

ZrW_2O_8 ve benzeri bileşikler, çok geniş bir sıcaklık aralığında (0 K–1050 K) NTE göstermektedir. Diğer taraftan bu malzemelerde her üç yönde de NTE gözlenmektedir. Bilindiği üzere ZrW_2O_8 bileşiği ZrO_6 sekizyüzlüsü (oktahedral) ile WO_4 dörtyüzlüsü (tetrahedral) içeren kübik bir kristal yapıya sahiptir. Burada üzerinde durulması gereken en önemli nokta kristal içindeki W-O-Zr zinciridir. Gözlenen negatif ısıl genleşme, bu zincirin enine salınımlarına atfedilmektedir [12]. Isıl uyarılma, ardışık polihedraları (çokyüzlüler) birbirine bağlayan oksijen atomlarının enine hareketine sebep olmaktadır. Dolayısıyla, yapı içindeki çokyüzlülerin her birisi katı bir eleman gibi veya geometrik yapıları çok az miktarda bozularak veya hiç bozulmadan, titreşerek zincirin boyunun kısalmasına neden olurlar. Bu olay rijid birim mod olarak bilinmektedir ve fonon spektrumunun düşük enerjilerinde görülür.

Aslında, böyle bir durumun olması halinde NTE'nın görülebilmesi 1952 yılında İ. M. Lifşits tarafından ispatlanmıştır. Lifşits'e göre bu özel yapıların gerçekleşebilmesinin en kolay yolu katmanlı veya zincir yapıya sahip olan kristallerin büyütülmesidir. Bu tür kristallerin en ünlüsü grafittir. Grubumuzda bir sıra katmanlı yapıya sahip kristaller vardır. Bunların her birisinde NTE ile ilgili yeni sonuçlar alınmaktadır.

Ferroelektrikler ve Ferrotoroikler

Bilgi depolama açısından baktığımızda, daha küçük hacme daha çok bilgi depolayabilmek için ferroelektrik nanoparçacıkların ve ince filmlerin son yıllarda oldukça ilgi gördüğünü söyleyebiliriz [13-14]. Bilindiği üzere, kendiliğinden polarize olma, yüzeye bağlı yüklerin oluşturduğu yüksek depolarize alanlarından ötürü nanoparçacıklarda ve ince filmlerde özellikle yüzeylere dik doğrultuda mümkün değildir. Bunun yanında, çok yakın zamanda lead titanat nanoparçacıklarının ferroelektrik özellikler gösterdiği bulunmuştur. Ferroelektrik nanoparçacıkların özelliklerinin araştırılması sırasında oldukça enteresan fiziksel olaylar gözlemlenmiştir. Düşük sıcaklıklarda parçacık boyutlarını küçültmek, kendiliğinden

polarize olmayı engeller. Gene de toroid momentum [15] diye adlandırılan bir polarizasyon durumu lead titanat bileşiğinin sergilediği bulunmuştur. Elektromanyetik çok kutuplu yapıların bu yeni çeşidi büyük ilgi uyandırmıştır.

Toroidal moment ismi şuradan gelmektedir: Bu durumda malzeme ortalama sıfır dipol momente sahip olmasına rağmen, sıfırdan farklı bir toroid momentine sahiptir. Toroidal durum, örneğin yukarıda değinildiği gibi dipollerin spiral yerleşmesiyle, veri depolamak için etkili bir metod olarak gözükmektedir. Bütün bunların yanında, bu tip malzemeler manyetik alana yerleştirildikleri zaman teorik limite (superdiamanyetizma) yakın yüksek diamanyetik susceptibility göstermektedirler. Daha önceden sadece süperiletkenlik fiziğinde karşılaştığımız bu yeni araştırma sahası, büyük ilgi toplayan bir konu haline gelmiştir [16].

Toroid momentine sahip bazı malzemeler, ferroelektrik ve ferromanyetik özellikleri aynı anda göstermektedirler. Bundan dolayı ferrotoroik veya multiferroik olarak adlandırılmaktadırlar. Ferrotoroikler, ya da diğer bir deyişle sıfırdan farklı toroid momentine sahip olan malzemelerin faz geçişleri bundan dolayı son yılların önde gelen araştırma alanları arasına girmiştir. Aynı anda manyetik ve elektrik alanlara duyarlı oldukları için manyetoelektrikler [13] de diyebileceğimiz bu malzemeler beklenmedik ve oldukça enteresan optik olaylar, örneğin ışık ışınları üzerine etki eden Lorentz kuvveti, ışıkta Hall etkisi gibi, göstermektedir [24]. Yukarıda gösterilen olayların araştırılması için ferooelektrik malzemelerin yüksek kaliteli ince filmlerinin yapılması gerekir. Grubumuzda araştırılan katmanlı kristallerin bir kaçı ferroelektrik özelliklerine sahiptir. Bu açıdan katmanlı yapının ferroelektrik özellikleri ile ne derecede etkileştiğinin öğrenilmesi mümkün olmuştur.

Nonlineer Fizik, Kaos

Uzun zamandan beri, nonlineer özellik gösteren sistemler fizikte özel bir ilgi görmektedir. Özellikle lazerin keşfinden sonra, yoğun bir şekilde çalışılan nonlineer optik olaylar, bu tip olaylara yanlızca bir örnektir. Yine sıklıkla karşılaştığımız solitonlar bir diğer örnek olarak verilebilir. Bu iki saha, günümüzde de fiziğin temel ilgi alanlarındandır. Şunu da belirtmek gerekir ki, nonlineer fiziğin sahası hızla

genişlemektedir. Dinamik kaos ve bunla ilgili olaylar hakkında oldukça fazla miktarda çalışma ve araştırmalar yapılmaktadır [18-19].

Bazı kristallerdeki akım ve voltaj kararsızlıklarının araştırılmasında, karşımıza kaotik davranışlar çıkmaktadır. Örneğin, yarı yalıtkan GaAs, Ge, Si vb. bileşiklerde düşük frekanslı akım salınımları kaydedilmiştir [20-21]. Bu salınımlar, negatif differansiyel iletkenlikten kaynaklanmaktadır. Bu nonlineer akım, yüksek dirençli yarıiletkenlerde, yük taşıyıcılarının derin safsızlık merkezleri tarafından tuzaklanmasıyla oluşmaktadır. Dolayısıyla NDC (negatif diferansiyel iletkenlik) gösteren kristallerin akım (yada voltaj) kararsızlıklarını çalışarak katı halde dinamik kaos modeli oluşturulabilir. Çalıştığımız kristallerin birkaçında bu tür olaylar görebildik. Ayrıca bu tip olayların kristallerin katmanlı yapı ile ilişkili olduğunu ispatladık.

Yukarıda olabildiğince özet olarak değinilen katıhal fiziğinde en önde gelen çalışma alanlarımızı çok kısa başlıklar halinde tekrar etmekte yarar vardır.

1. *Yakın kızılötesi ve hatta görünür bölgeler için fotonik kristal yapımı.*
2. *Yüksek derecede anizotropik 2 boyutlu sistemlerde elektron-deşik sıvısı araştırmaları.*
3. *Negatif ısıl genleşme gösteren malzemelerin ve negatif genleşme mekanizmasının araştırılması.*
4. *Düşük boyutlu ferroelektrik malzemelerin araştırılması.*
5. *Yarıiletkenlerde non-lineer elektrik ve optik özelliklerin araştırılması.*

Yukarıdaki problemlerin incelemesi ve araştırması için gurubumuz 3 alt birime bölünmüştür. Birimlerimizin birinde katmanlı kristallerin elektrik, dielektrik ve piroelektrik özellikleri araştırılıyor. Bu araştırmaların esas amacı kristallerde akım mekanizmalarının, dielektrik relaksasyon mekanizmalarının ve kutuplanma mekanizmalarının çalışılmasıdır. Birimlerimizin bir başkasında kristallerin optik ve fotoelektrik özellikleri araştırılıyor. Üçüncü birimimizin esas araştırma konusu katılarda ısıl genleşmenin öğrenilmesidir. Yukarıda gösterilen araştırmaların gerçekleştirebilmesi için gurubumuzun iyi bir cihaz altyapısı vardır: ”close cycle” kriostat sistemi (10-300K), UV-visible monokromator (200–700 nm). Lock-in amplifier, çeşitli ışık kaynakları (300 W ksenon lamba), ısısal genleşmenin ölçmesi için

interferometre, çeşitli lazerler vb. Bundan başka, Azerbaycan Bilimler Akademisi, Fizik Enstitüsü ile birlikte katmanlı yapıya sahip GaSe, GaS, InSe, $TlGaSe_2$, $TlInS_2$, $TlGaS_2$, $TlInSe_2$, TlS gibi yüksek kaliteli kristallerin alınmasını da temin ettik. Bu kristallerin 6'sı katmanlı, son ikisi ise zincir yapıya sahiptir.

Isıl Genleşme Laboratuarı

Aşağıda, son birkaç yılda elde ettiğimiz ve yukarıda gösterdiğimiz temel araştırma konuları ile ilgili sonuçlarımızın kısa özeti verilmiştir. Son yıllarda 20'nin üstünde makalemiz yayımlanmıştır ve bir TÜBİTAK projemiz yürütülmektedir. Gurubumuzda iki profesör, 6 doktora ve 4 yüksek lisans öğrencisi bulunmaktadır.

İlk başta, nerdeyse bütün katmanlı kristallerde valans bandının en üstü ve ilektenkik bandının alt kısmı yakınlarındaki elektron durumları uygulamada izotropik olarak kurulmuştu. Bu elektronlar katmanlara dağılmış görülmez. Yani bunun manası katmanlı yapılarla kristallerin çoğunda iki boyutlu elektron gazı oluşturmak imkansızdır. Elektron transport özellikleri ayrıca yüksek anizotrobik olmaya döner. Yani katmanların yüzeyine doğru iletkenlik, katman yüzeylerine dik yöndeki iletkenlikten (10^2- 10^3) kat yüksektir. Bu çelişki katmanlı kristallerdeki kusurların yani birbiri ile katmanlara istiflenen kusurlarda elde edilen dikkate değer özel karaterlerin açıklanabilmesinde gösterilmiştir. Bu hatalar katman yüzeylerindeki taşıyıcıların tedirgenme hareketi değildir, fakat dik yöndeki hareketlerini oldukça rahatsız eder. Yani katmanlı kristallerin başlıca tuhaflığı düzlem kusurlarının katmanlı karaktere sahip olmasıdır. Aşağıda görüleceği üzere bu özellikteki kusur yapıları katmanlı kristallerin birçok olağanüstü özelliğine neden teşkil eder. Örneğin katmanlı kristallerden biri olan GeS, kusurların spesifik tipinden dolayı optiksel katmanlı ortam

gibi davranır. Böyle ortamların optiksel özellikleri çok gariptir: n=0.14 düşük kırılma indisli optiksel ortam gibi davranır. n'nin bu değeri iki bağımsız deneyden, düzlem paralel tabakaların girişim spektrumu ve aynı tabakaların kırılma spektrumu, elde edilir. GeS tabakalı kristali düşük krılma indisli bir boyutlu fotonik kristal gibi davranır. Bu davranışın detaylı mekanizmaları hala araştırılmaktadır. Bu tip davranışların muhtemel sonuçları her durumda katmanlı hata yapısındadır.

Katıhal Optiği Laboratuarı

Bir başka katmanlı yarıiletken $TaGaSe_2$ kristalinin elektriksel özelliklerinin ölçülmesinde katmanlı kusur yapısının ilginç özelliklerinin başka bir setini gözlemledik. Katmanlara dik yöndeki akım çok spesifik alışıla gelmedik karaktere sahiptir. Alışıldık yarıiletken karakteri yernine katmanlara dik yöndeki ilektkenlik sıcaklık ve zaman ile kaotik durgun olmayan salınım gösterir. Bu davranışı açıklamak için bu kristallerin katmanlı kusur yapıları yüzünden kapasitör ve dirençlerin bir serisi gibi davrandığı farzedilir. Dielektrik spektroskopi araştırmaları katmanlara dik yönde spesifik kristal yapısı yüzünden taşıyıcılar için böyle normal olmayan büyüklükteki durulma zamanının mikroskobik orijinini verir.

Böyle tabakalı kristaller en azından iki boyutlu elektron gazı, bir boyutlu fotonik kristal ve durgun olmayan kaotik elektron transportu gibi iki olayın araştırılması için model olarak kullanılabilir. Bu davranışların sebebi böyle malzemelerin ideal katmanlı yapıda olmamasıdır, fakat onların kusur yapısı katmanlı karakterdedir.

Negatif Isısal Genleşme (NTE), 1983 senesinde Grafit kristali için yeni bir model ilk defa öngörüldüğünden beri, bu grup üyelerinin çalışma alanlarının

merkezinde yer almaktadır. Bugün NTE'yi açıklayan modellerin hiçbiri temelde I. M. Lifschitz'in 1952 senesinde öngördüğü modelden pek farklı değildir. Kristalde bir yönde titreşim olurken, NTE oluşması için, salınımın yönüne dik yönde bir sıkışmaya sebep olan katı (rijit) birimlerin kristalde olması gerekmektedir. Bu mekanizmanın çoğu zincir ve katmanlı kristallerde geçerli olduğu görülmesine rağmen (bunlarda rijit birimler) katmanlı $TlGaSe_2$ kristalinde NTE mekanizmasını açıklayamaz. Son bulgularımız gösteriyor ki yukarıda anlatılanların aksine $TlGaSe_2$ kristalinde NTE elektron-fonon etkileşiminden kaynaklanır yani elektron altsistemi bu kristalde NTE' nin temel sebebidir. Bu sebepten dolayı $TlGaSe_2$ kristali, dış elektrik alan ve ışık etkisi dahil olmak üzere, elektron altsistemini etkileyen pertürbasyonlara karşı oldukça hassastır. Mesela, yasak bant enerji aralığından yüksek bir enerjiye sahip ışığa maruz bırakıldıktan sonra NTE katsayısı 3 kat artmıştır. Işığın aksine dış elektrik alan NTE katsayısının düşmesine sebep olmaktadır. NTE'nin bu davranışı inceleme altındadır. Fakat bunun ana sebebinin tam belirlenmemiş olan kusur yapısından kaynaklandığı şimdiden söylenebilir. Gerçekten de aynı kusur seviyelerinin NTE' ye sebep olduğu gösterilmiş ve aşikâre bilinmeyen katmanlararası elektriksel iletkenlik mekanizması da yukarıda izah edilmiştir.

Optoelektronik Laboratuarı

Bahsedildiği üzere katmanlı kristallerin bazıları ferroelektrik özellik gösterirler. Bunlar $TlGaSe_2$ ve $TlInS_2$ dir. Her iki kristal de ferroelektrik faza bir "ara belirsiz faz"dan geçerler (intermediate incommensurate phase, INC). Bu kristallerin faz geçişleri ile alakalı olarak pek çok teorik ve deneysel çalışma bulunmaktadır. Bizce bu kristallerin gerçekten ilginç olan ferroelektrik ve INC fazları hakkında deneysel hiçbir ipucu yoktur. Bunun yanında en azından $TlGaSe_2$ kristalinin faz geçişlerinin muhtemel toroidal davranışına işaret eden teorik ve deneysel sonuçlar da mevcuttur.

Bizim çalışmalarımızdan önce bulunan bu verileri bizler de çalışmalarımızda elde ettik. Yine de cevabın bulunması için daha yapılması gereken çok şey var. Yıllar önce Y. Kopaev şunu göstermiştir: Eğer kristalin bulunduğu son durum sıfırdan farklı toroidal momentli bir durumsa o halde kristalin "yumuşak modlarının" (soft modes) sıcaklık ile alakalı çok özel bir özelliğinin bulunması gerekir. Doğal olan yumuşama sıcaklığı düşürdükten sonra "yumuşak mod" kendini göstermeye başlar. Bugün bu davranışı sergileyen tek kristal $TlGaSe_2$ dir. Çalışmalarımız, akım kararsızlıklarının ve yukarıda bahsedilen ısısal genleşmedeki garipliklerin her ikisinin de yumuşak modların bulunduğu sıcaklık aralığında olduğunu göstermiştir. Şu anda bu üç ayrı olayın arasındaki bağlantıyı ortaya koymak zordur. Fakat temel problemi inceleme şansımız mevcut. O da şudur: Yukarıda adı geçen üç fenomenin ikisi hakkında bilgimiz var ve bu ikisi de katmanlı kristallerin özel kusur yapısı ile alakalıdır.

Kaynaklar:

1- D Saumon and G Chabrier Physical Review A 1992, Volume 46, Issue 4 pp. 2084-2100
2- E.A. Andryushin, et al., JETP Lett. 24 (1976) 185
3- Ginzburg V.L. – USPEKHI (Uspekhi Fizicheskix nauk), 2004,v.174, N11, p.1240
4- Kallio A and X. Xiong Physical Review B ,1990, V. 41, N 4, pp. 2530-2533
5- R Shimano,1 M Nagai, K Horiuch, and M Gonokami Phys. Rev. Lett. 2002, V. 88, N5, p.057404
6- J B Pendry and S A Ramakrishna J. Phys.: Condens.Matter15 No 37 (2003) 6345–6364
7- Pendry JB CONTEMPORARY PHYSICS 45 (3): 191-202 MAY-JUN 2004
8- Notomi M OPTICAL AND QUANTUM ELECTRONICS 34 (1-3): 133-143 JAN 2002
9- S Anantha Ramakrishna Rep. Prog. Phys. **68** (2005) 449–521
10- David R. Smith SCIENCE, VOL 308 (2005) 502
11- G. Tucker, A L.Goodwin, MT. Dove, D A.Keen, S A.Wells, and J S.O.Evans PRL 2005, 95,255501
12- R.Mittal et al., Phys.Rev.Lett. 86, 4692 (2001).
13- Manfred Fiebig J. Phys. D: Appl. Phys. **38** (2005) R123–R152
14- Ivan I. Naumov, L. Bellaiche & Huaxiang Fu NATURE VOL 432 9 DECEMBER 2004
15- V. M. Dubovik, M. A. Martsenyuk, Bijan Saha PHYSICAL REVIEW E 2000 V61, p.67087
16- T.A.Mary et al., Science 272, 90 (1996).
17- K Sawada1, and N.Nagaosa, PHYSICAL REVIEW LETTERS **95,** 237402 (2005)
18- E. N. Lorenz, *J. Arm. Science,* vol. 20, pp. 130-141, 1963.
19- Ch. Karakotsou, A.N. Anagnostopoulos Physica D 93 (1996) 157-164
20- R.L. da Silva et al., Physica D 194 (2004) 166
21- E Cartlidge, Physics World April (2004) 8-9

OPTOELEKTRONİK GRUBU

Öğretim Üyeleri	Doktora Öğrencileri	Yüksek Lisans Öğrencileri
Prof. Dr. Rauf Süleymanlı	Yasin Şale	Serdar Gören
Prof. Dr. MirHasan Seyitsoy		