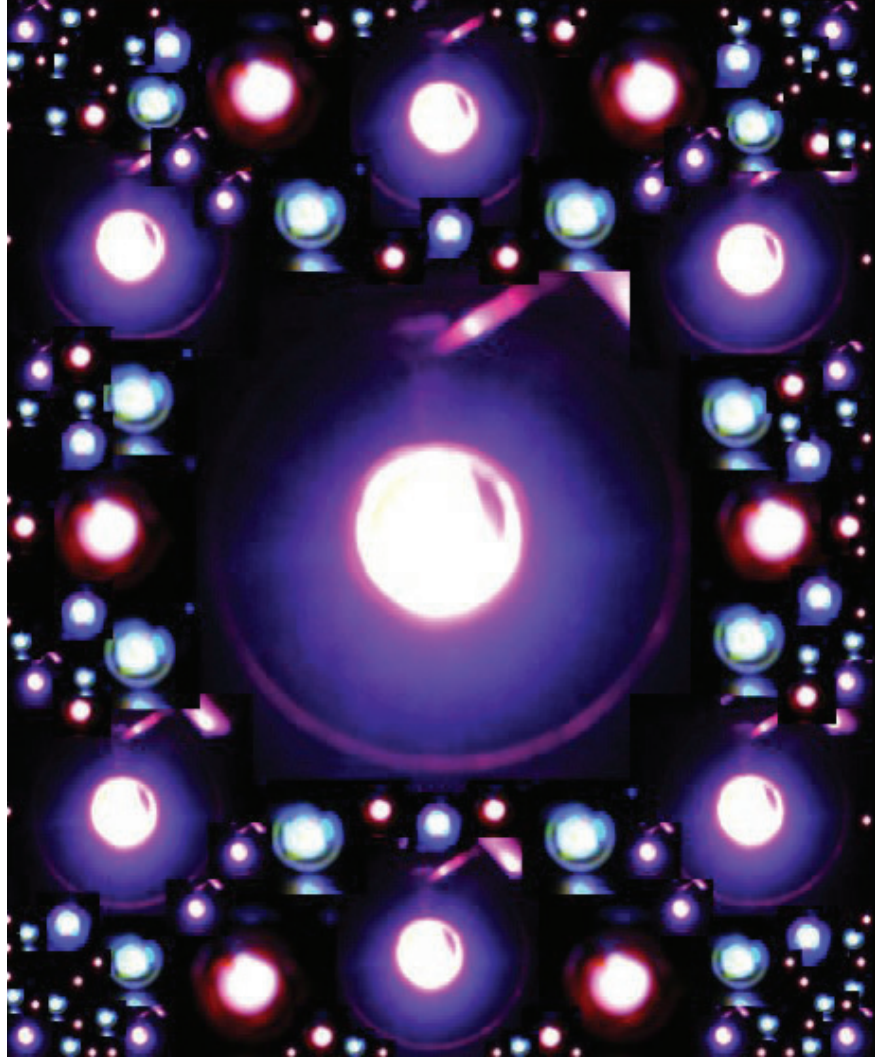


NANOKRİSTALLER İLE ALTERNATİF BEYAZ IŞIK!

Günümüzde, LED (Light Emitting Diode, Işık Yayan Diyot) olarak adlandırılan katı hal aydınlatma teknolojisinin günlük hayatımızdaki yeri giderek artmaktadır. LED'lerin hali hazırda var olan ampulsüz trafik ışıkları, kamera, mikroskop ışık kaynakları gibi kullanım alanlarının zaman içerisinde genişlemesi öngörülmüyor. İleride LED'lerin evlerimizdeki ampuller ve floresan lambalarının yerine geçecekleri ve otomobillerin tüm dış aydınlatma işlemlerini gerçekleştirecekleri bekleniyor. LED'lere artan ilginin temel nedeni, bu teknoloji ile üretilen ışık kaynaklarının uzun süre dayanıklılığını koruması ve elektrik enerjisi tüketiminin düşük olması. Diğer ışık kaynaklarının dayanaksızlığını, evimizde ampulleri ne sıklıkta değiştirdiğimizi düşünerek kolayca anlayabiliriz. Bir LED'i günde 12 saatten 23 yıl süreyle kullanabilmemiz mümkün. Bu da yaşamımız boyunca sadece 4 defa LED ışık kaynağımızı yenilememiz gerekeceği anlamına gelmekte. LED'lerin elektrik enerjisi tüketiminde sağladıkları tasarrufa çok daha etkileyici. Bir binanın stratejik noktalarına LED'ler konularak aydınlatma yapıldığı zaman, günümüzde kullanılan sistemlere göre %90'lık bir elektrik tüketimi tasarrufu sağlanabilmekte. Bu bahsettiğimiz nedenlerden dolayı, katı hal aydınlatma sistemleri bilimsel ve ticari açıdan büyük bir ilgi uyandırmış durumda. Ancak, üretilen ışık kalitesinin yüksek olması ve ayarlanabilmesi, günlük hayat uygulamaları açısından çok önemli. Bu gereksinimini karşılamak üzere, Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezinde ve İleri Araştırma Laboratuvarında Aygıt ve Sensör Araştırma



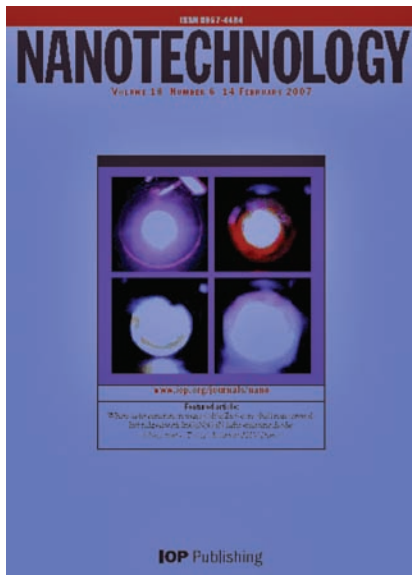
Grubumuzda ürettiğimiz LED platformu üzerinde nanokristaller ile melezleştirerek yüksek kaliteli beyaz ışık kaynakları elde edildi. Bu çalışmada dünyada ilk kez farklı nanokristal bileşimleri kullanılarak beyaz ışığın ayarlanabilir renk özellikleri gösterildi. Bu nedenden dolayı, bu araştırma sonuçları, öğrenciler Sedat Nizamoglu, Tuncay Özel, Emre Sarı ve Yrd.

Doç. Dr. Hilmi Volkan Demir tarafından uluslararası düzeyde saygınlığa sahip NANOTECHNOLOGY bilimsel dergisinde kapak olarak özellikli makale olarak yayımlandı. Şekil 1'de bu çalışmanın yayımlandığı NANOTECHNOLOGY dergisinin kapak fotoğrafı gösteriliyor.

LED'lerin çalışma mekanizması, en genel aydınlatma sistemlerindeki gibi



temel olarak elektrik enerjisinin optik enerjiye çevrilmesi prensibine dayanır. Diyotun içerisinde farklı enerji seviyelerindeki elektron ve deşiklerin (elektronunu yitirmiş olduğu için + yük kazanan bölge) birleşerek ışımaya yapması ile, elektriksel enerji optik



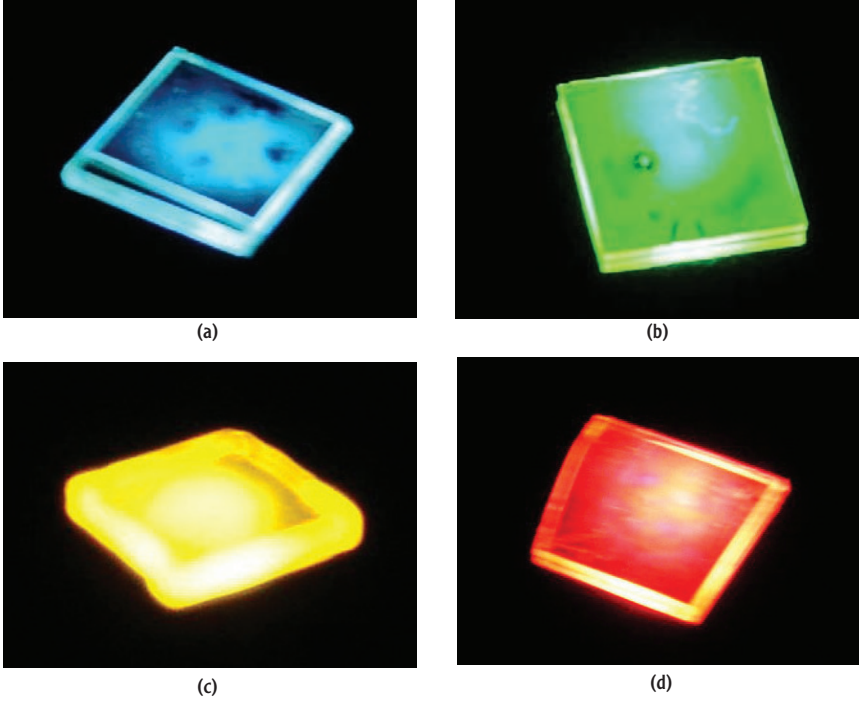
Şekil 1. Sedat Nizamoglu, Tuncay Özel, Emre Sarı ve Dr. Hilmi Volkan Demir tarafından beyaz ışık üreten nanokristal ile melezleştirilmiş diyot çalışmaları, özellikli makale olarak yayınlandığı NANO-TECHNOLOGY uluslararası bilimsel dergisinin kapak konusu oldu.

enerjiye dönüşür. Bu ışımaya, materyalin enerji seviyelerinin farkına karşılık gelecek fotonlardan oluşur. Dolayısıyla ışımaya enerjisi, ışımayı gerçekleştiren yarı iletken kristal malzemeye göre belli bir dalga boyunda ortaya çıkar. Eğer bu enerji farkı görünür bölgeye karşılık geliyorsa, gözümüzün algılayacağı bir renkte ışımaya oluşur. Belli malzemeler ayrıca ışıkla uyarılarak da ışımaya yapabilir. Bu tarz ışımaya, fotoışımaya olarak adlandırılır. Bu şekilde ışımaya elde etmek için floresan materyalin ayrık enerji seviyelerinden daha yüksek enerjili bir fotonla uyarılması gerekir. Böylece bu maddenin ayrık enerjilerinin farkı kadar enerjiye sahip fotonlarla ışımaya yapması sağlanır.

Bugün en yaygın beyaz LED teknolojisi olarak, elektroışımaya ve fotoışımaya beraber kullanıldığı fosfor tabanlı renk dönüşümü tekniği kullanılıyor. Bu teknikte alttaki mavi In-GaN/GaN (kuvantum kuyusu/ kuvantum bariyeri) LED platformunun üstü, sarı ağırlıklı geniş bir spektrumda ışıyan fosfor ile kaplanıyor. Bu şekilde belirli akımlarla çalıştırılan mavi LED'in elektroışımaya, üstte bulunan fosfor tabakası tarafından soğurulup,

fosforun fotoışımaya yapması sağlanmakta. Fosfor tarafından soğurulmadan geçen mavi dalga boyundaki elektroışımaya, fosforun fotoışımaya ile birleşmesi sayesinde gözün beyaz olarak algılayacağı bir ışık spektrumu oluşmakta. Ancak, fosfordan düzgün film oluşturma ile ilgili problemler (granül boyutu kontrolü, sabit film kalınlığı gibi) bulunmakta. Buysa, istenmeyen renk değişikliklerine yol açmakta ve renk kalitesini düşürmektedir. Ayrıca, bu yaklaşımıyla renk özelliklerinde ince ayar yapmak çok zor.

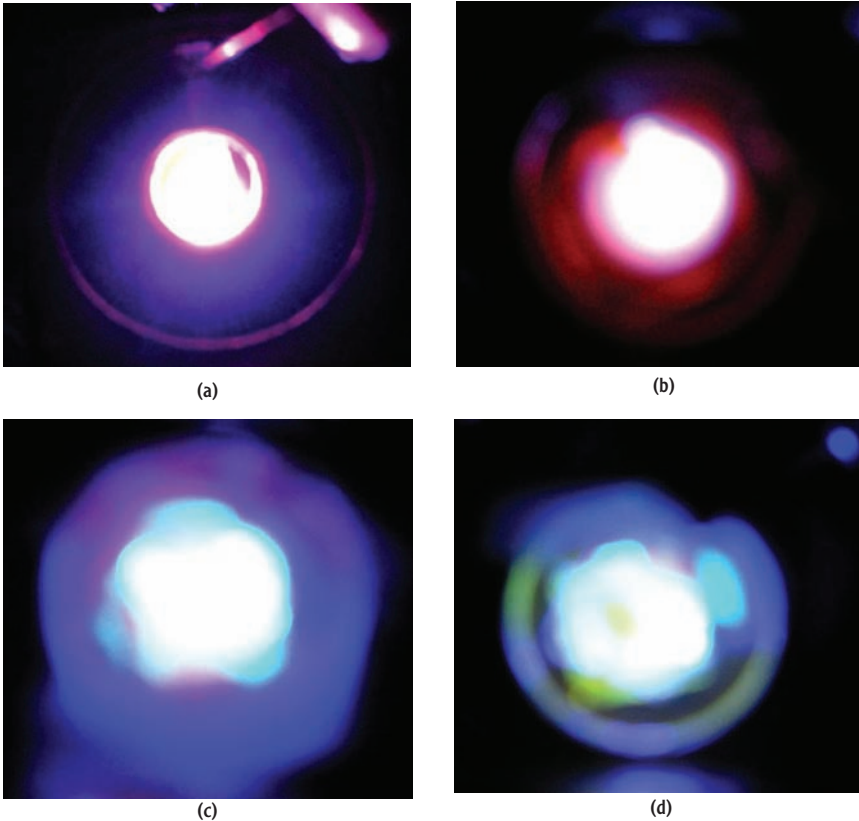
Bu yöntem alternatif olarak, kaliteli ve ayarlanabilir beyaz ışık üretmek için araştırma grubumuzda nanokristal katkılı renk dönüşüm tekniği üzerinde bilimsel araştırma yapmaktayız. Nanokristallerde (kuvantum noktacıklarında) yarı iletken kristalinin boyutları, Bohr elektron çapına göre küçük sentezlenmeye başlandığında üç boyutta kuvantum sınırlandırması elde edilir ve bu şekilde kuvantum boyut etkisi gözlemlenir. Diğer bir deyişle, artık nanometre ölçeğine indirilmiş kristalin ayrık enerji seviyeleri, kristal boyutları değiştirilerek ayarlanıp kontrol edilebilir hale gelir. Böylece, nanokristallerin ışımaya



Şekil 2. Laboratuvarlarımızda morötesi (UV) ışık altında uyarılan (a) camgöbeği, (b) yeşil, (c) sarı ve (d) kırmızı CdSe/ZnS kabuk/çekirdek nanokristallerinin fotoışıması gösterilmektedir.

dalga boyları farklılaşmaya başlar ve değiştirilebilir nanokristal boyutları sayesinde enerji farkı görünür bölge

dalgaboyundaki fotonlara karşılık gelecek şekilde ayarlanabilir. Sonuç olarak Şekil 2'deki gibi aynı malzeme



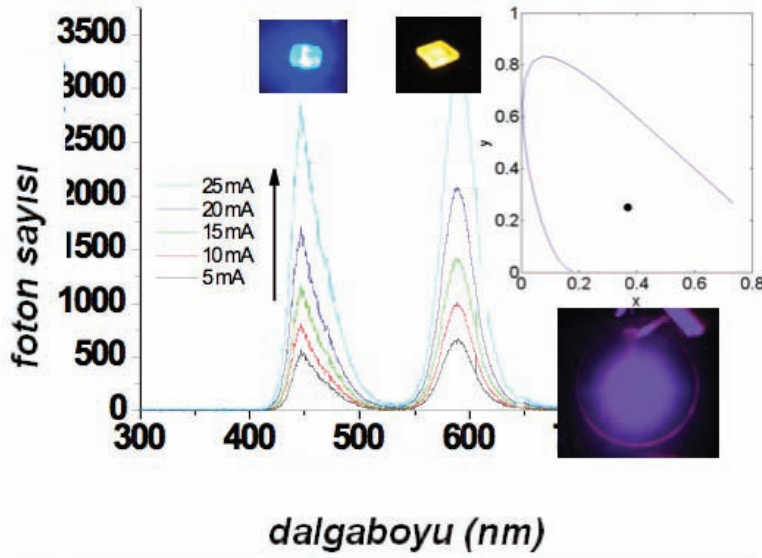
Şekil 3. Nanokristal katkılı melez beyaz ışık üreten LED'lerimizin ışıma görüntüleri:

(a) Sarı nanokristaller ($\lambda_{FI}=580$ nm) ile mavi LED ($\lambda_{EI}=440$ nm), (b) camgöbeği ve kırmızı nanokristaller ($\lambda_{FI}=500$ nm and 620 nm) ile mavi LED ($\lambda_{EI}=440$ nm), (c) yeşil, sarı ve kırmızı nanokristaller ($\lambda_{FI}=540$ nm, 580 nm and 620 nm) ile mavi LED ($\lambda_{EI}=452$ nm) melezleştirildi ve (d) yeşil, camgöbeği, sarı ve kırmızı nanokristaller ($\lambda_{FI}=540$ nm, 500 nm, 580 nm and 620 nm) ile mavi LED ($\lambda_{EI}=452$ nm) melezleştirildi

den yapılmasına karşın, nanokristallerde boyut etkisi kullanılarak fotoışımalarında değişik renkler elde edilir. Araştırma çalışmamızda beyaz ışık üretiminde fosfor yerine nanokristal kullanmamızın en önemli avantajlarından biri kombinasyonlarımızı LED'lerimiz üzerine melezleştirerek beyaz ışığın optik özelliklerini gösteren parametreleri ayarlayabilir olmamız. Bu parametreler arasında bir ışık kaynağının 1931 CIE renk diyagramı (Commission Internationale de l'Eclairage chromaticity diagram) üzerindeki yerini gösteren (x,y) koordinat noktası, ışığın renginin maviye mi yoksa kırmızıya mı yakın olduğunu gösteren renk sıcaklığı (color temperature) ve beyaz ışığın kalitesini belirten renk dönüşüm indeksi (color rendering index) bulunmaktadır. Şekil 3'te tasarım, büyüme, fabrikasyon, melezleştirme ve karakterizasyon basamaklarının tümünü Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi ve İleri Araştırma Laboratuvarlarında gerçekleştirdiğimiz beyaz LED'lerimizle tekli, ikili, üçlü ve dörtlü CdSe/ZnS çekirdek-kabuk nanokristal kombinasyonlarımızda elde ettiğimiz beyaz ışık fotoğrafları görülmektedir.

Tek çeşit nanokristal kullanarak melezleştirdiğimiz 440 nm In-GaN/GaN LED'imizin değişik akım seviyelerindeki elektroışımaları Şekil 4'te gösteriliyor. Burada beyazlık şartını sağlamak için 440 nm'lik mavi LED üzerine sarı nanokristal ($\lambda_{FI}=580$ nm) seçilmiş, ardından gerekli konsantrasyon ve kalınlıkta sarı nanokristal filmi melezleştirilerek beyaz ışık elde edilmiş bulunuyor. Bu ışık kaynağının CIE renk diyagramında renk koordinatları $x = 0,37$ ve $y = 0,25$, renk sıcaklığı $T_c = 2692$ K ve renk dönüşüm indeksi $R_a = 14,6$. Şekil 4'te ayrıca aygıtımızın CIE renk diyagramında karşılık geldiği nokta görülmektedir. Bu operasyon noktası, matematiksel olarak CIE renk diyagramında beyazlık alanı içerisinde. Ancak, ışık kaynağı sarı nanokristal ve mavi LED'in melezleştirilmesinden sadece çift renkli olarak oluşturulduğu için renk dönüşüm indeksi düşük. Bunu, farklı kombinasyonlarda nanokristal melezleştirmesi ile artırmak mümkün.

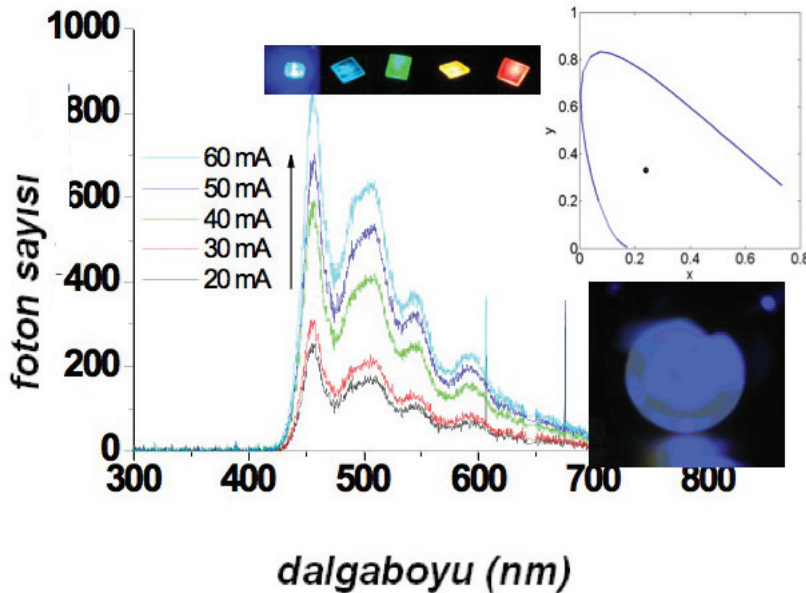
Dört çeşit mavi, yeşil, sarı ve kırmızı renkte ışık üreten nanokristal



Şekil 4. Sarı nanokristaller ($\lambda_{FI}=580$ nm) ile mavi LED melezleştirilmesiyle oluşan aygıtımızın ($\lambda_{EI}=440$ nm) oda sıcaklığında değişik akımlar altındaki elektroışması, karşılık geldiği (x,y) kordinatı ve mavi LED'in, sarı nanokristallerin ve melez aygıtımızın ışına görüntüleri gösterilmektedir.

LED $\lambda_{elektroışması}(nm)$	NC $\lambda_{f\ddot{u}l\ddot{o}r\ddot{a}san}(nm)$	(x,y)	T_c (K)	R_a
440	580	(0.37,0.25)	2692	14.6
440	500,620	(0.37,0.28)	3246	19.6
452	540, 580, 620	(0.3,0.28)	7521	40.9
452	540, 500, 580, 620	(0.24,0.33)	11171	

Tablo 1. Melez aygıtlarımızın özellikleri.



Şekil 6. Camgöbeği, yeşil, camgöbeği, sarı ve kırmızı nanokristaller ($\lambda_{FI}=500$ nm, 540 nm, 580 nm and 620 nm) ile mavi LED ($\lambda_{EI}=452$ nm) melezleştirilmesiyle oluşan aygıtımızın oda sıcaklığında değişik akımlar altındaki elektroışması, karşılık geldiği (x,y) kordinatı ve mavi LED'in, yeşil, camgöbeği, sarı, kırmızı nanokristaller ve melez aygıtımızın ışırken fotoğrafları.

($\lambda_{FI}=500$ nm, 540 nm, 580 nm ve 620 nm) kombinasyonunu 452 nm'lik mavi LED ile melezleştirilmemiz sonucunda, $x=0.24$, $y=0.33$, $T_c=11171$ K ve $R_a=71.0$ 'e karşılık gelen beyaz ışık elde ettik. Dört çeşit nanokristal kullandığımız zaman renk dönüşüm indeksi tek çeşit nanokristal kullandığımız aygıtımıza göre yaklaşık 4 kattan fazla artarak 71.0'a ulaşmıştır. Bu çalışmalar nanokristal kullanarak kaliteli beyaz ışık kaynaklarının yapılabirliğini göstermekte. Bu şekilde aygıt parametrelerini doğru tasarlayarak renk dönüşüm indeksini kontrol etmek ve farklı kombinasyonlarda gerekirse polimer ile melezleştirerek yüksek kaliteli beyaz ışık yapmak mümkün. Tekli, ikili, üçlü ve dördü kobinasyonlarda oluşturduğumuz nanokristal katkılı beyaz LED'lerimizin optik özellikleri Tablo1'de özetlenmiş bulunuyor.

Sonuç olarak, Dr. Hilmi Volkan Demir yönetiminde bu araştırma çalışmamızla dünyada ilk defa CdSe/ZnS çekirdek-kabuk nanokristallerinin tekli, ikili, üçlü ve dördü kobinasyonlarını InGaN/GaN LED'lerimiz üzerine melezleştirerek ayarlanabilir renk özellikleri ile yüksek kaliteli beyaz ışık üretilebileceği gösterildi. Melez aygıtımızın tasarımı, büyütmesi, fabrikasyonu, melezleştirilmesi ve karakterizasyonu Bilkent Üniversitesi Nanoteknoloji Araştırma Merkezi ve İleri Araştırma Laboratuvarlarında gerçekleştirildi. Bu çalışmamızda, nanokristal katkılı melez aygıtlarımızın doğru tasarımı ve fabrikasyonu ile CIE diyagramı koordinatı, renk sıcaklığı ve renk dönüşüm indeksi gibi beyaz ışık renk özelliklerinin ayarlanabileceği gösterildi. Deneysel çalışmamıza dayanarak, ayarlanabilir ve üstün özellikleri ile beyaz ışık üreten bu tarz nanokristalli melez LED'lerin, geleceğin aydınlatma sistemlerinde önemli yer alacağı öngörülmüştür.

Sedat Nizamoglu, Tuncay Özel,
Emre Sarı ve Yrd. Doç. Dr.
Hilmi Volkan Demir
Fizik Bölümü ve Elektrik-Elektronik
Mühendisliği Bölümü
Nanoteknoloji Araştırma Merkezi,
Bilkent Üniversitesi, Bilkent Ankara 06800
volkan@bilkent.edu.tr

Kaynak
Nizamoglu S, Ozel T, Sari E and Demir H V 2007 Nanotechnology 18