

Darbeli Güç Uygulamaları İçin GaAs Tabanlı Opto Tristör*

I. GİRİŞ

Anahtariama aygıtları, yüksek güçlü darbeli lazerler ve parçacık hızlandırıcıları gibi darbeli güç dizgelerinin temel parçalarıdır. Bu parçaların bazı istenen özellikleri; yüksek engelleme gerilimi, yüksek tepe akım, yüksek akım yükselme hızı, düşük kayıp, yüksek kapı lama kazancı, kapı izolasyonu ve uzun kullanım ömrüdür. Bu tip darbeli güç anahtarları için uygun olan adaylar optik kapılmalı yarı iletken anahtarlardır, özellikle GaAs ve onun üçlü bileşenleri olmak üzere III-V grubu bileşik yarı iletkenler, malzeme ve eklem özellikleri olarak yüksek di/dt oranını sağlayacak yapıdadırlar, bu nedenle bu tip uygulamalarda tercih edilen malzemelerdir, örneğin; Si'den daha büyük yasak band aralığına sahip olan GaAs daha yüksek sıcaklık ve daha yüksek ışınım enerjisi ile çalışabilir. Büyük yasak band aralığı aynı zamanda eklemli aygıtlarda daha yüksek yıkım gerilimlerine ulaşmasını sağlar [1]. GaAs'ın direkt yasak band aralıklı yapısı optik kapılama işlemlerinde çok önemli olan fotonların soğurulması ve yayımının verimli olmasına yardımcı olur. Buna ek olarak Si'den daha yüksek elektron mobilitesine sahip olan GaAs daha hızlı anahtariama ve elektron sürüklenmesinin etkin olduğu aygıtlarda daha düşük direnç gösterir.

Son zamanlarda GaAs/AlGaAs malzeme tabanlı tristörler üzerine yapılan araştırma sonuçlarında [2-4] di/dt oranının 5×10^{10} A/s dolayında olduğu bildirilmiştir. Ancak bu çalışmalarda bildirilen tepe akım değerleri IOA'den daha azdır. GaAs ve Si tristörlerin akım yükselme üssel zaman sabitlerini karşılaştıran bir çalışma bu sabitin GaAs tristörlerde Si tristörlerden 5 kat daha yüksek olduğunu bulmuştur [5]. Bu çalışmalarda ortaya çıkan ilginç bir nokta, açıl-

Çeviri: Şimşek DEMİR

• IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES
Aralık 1990, 37 Sayı: 12, s.2520

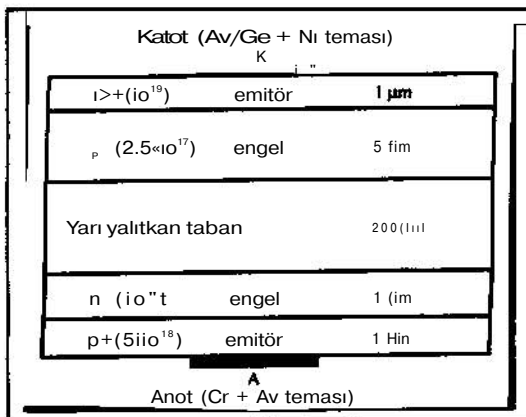
386- ELEKTRİK A F * \
MÜHENDİSLİĞİ I U O

ma süresinin doyum hızı ile baz katmanından geçen elektronlar için hesaplanan değerden daha kısa olmasıdır. Bu hızlı açılmalı GaAs tristörlerini açıklamak için sağlam bir kuram olmasa da, fotonların baz bölgesinde yaratılmasının ve tekrar soğurulmasının bu mekanizmada önemli rol oynadığına inanılmaktadır [6]. Bu tristörlerin optoelektronik olarak işlemleri bütün aygıtların homojen olarak açılmasını sağladığından fazlası ile önemlidir. Si aygıtlarda açılma süresinin akım dağılımı ile sınırlandırıldığı kabul edilmektedir.

III-V bileşikleri tabanlı eklemli aygıtların darbeleri güç uygulamalarındaki kullanılabilirliğini araştıran bir çalışmada yarı yalıtkan bazı olan GaAs tabanlı bir optotristör incelenmiş ve sonuçları bu yazıda sunulmuştur. Genil (maksimum) DA (DC-doğru akım) engel gerilimi 800V ve karanlıkta sızıdırma akımı 12 μ A olarak bulunmuştur. Aygıt, genil 300A tepelik akımı ve 1.5x10⁺¹⁰ A/s di/dt ile akım darbelerini anahtarıyabilmiştir.

II. AYGIT YAPISI VE ÜRETİMİ

Şekil 1 tristör yapısının bir kesitini göstermektedir. Cr katkı, Brkigman büyütme, yer yalıtkan (100) GaAs, taban başlangıç malzemesi olarak kullanılmış ve



ŞEKİL 1- Cr katkı, Bridgman büyütme, yer yalıtkan GaAs baz kalmanı olan GaAs opto ürünü bir kesit

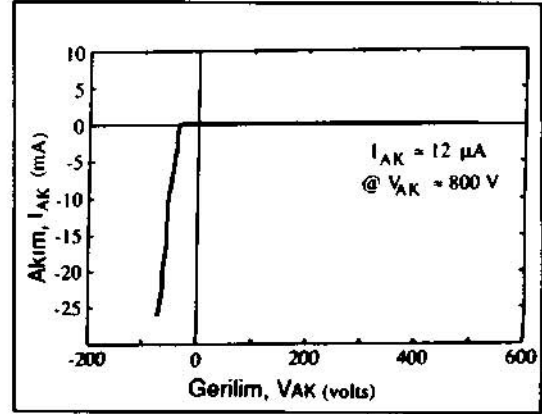
aygıt yapısındaki epitaksiyel katmanlar metal organik kimyasal buhar depositi (MOCVD) ile büyütülmüştür. Taban ilk önce konvansiyonel çözücüler ile temizlenmiş ve kimyasal olarak H2SO4 : H2 O2 : H2O (5:1:1) çözeltisinde n engel ve p+ emitör katmanlarının büyütülmesinden önce aşındırıl-

mıştır. Bu katmanların her ikisinin de kalınlığı 1 μ m ve katkı lama yoğunluğu sırasıyla 10⁺¹⁷ ve 5x10⁺¹⁸cm⁻³tür.

Tabanın öteki yüzü 200 μ m civarında kalınlığa mekanik olarak getirilmiş ve kimyasal-mekanik olarak sodyum hipoklorit ve "@collidal silica" kullanılarak düzeltilmiştir. Düzlenen yüzey temizlenmiş ve kimyasal olarak aşındırılmış, bunu takiben sırası ile 5 μ m ve 1 μ m kalınlığında, 2.5x10⁺¹⁷ ve 10⁺¹⁹ cm⁻³ katkı p engel ve n+ emitör katmanları büyütülmüştür, p engel, yarı yalıtkan ve n engel katmanları tristörün p-i-n yapısını böylelikle oluşturmuş olur.

Yüzey oksitlerini ortadan kaldırmak için, metalizasyon yapıma-

dan önce malzeme HCl:H2O (1:5) çözeltisine daldırılmıştır, n-tipli temas noktası sırasıyla 1500A Au:Ge ve 400 A Ni buharlaştırması ile, p-tipli temas noktası ise sırasıyla 100ACr ve 1200 A Au buharlaştırarak oluşturulmuştur. Metalik temaslar için 1 mm çapında nokta yapı kullanılmıştır. Üretilen malzeme 5x5mm² alanlara sahip olan



ŞEKİL2- GaAs Opto ürünü 6çk AVözeHİği. 800°engelleme genhmiçim karanlıkta sızıdırma akımı 12/µA.

bağımsız tristörler oluşturmak üzere parçalanmıştır. Alınan bazı örnekler NH₄OH:H₂O₂:H₂O (1:1:5) çözeltisinde de 30 saniye süreyle aşındırılmıştır.

III. DA Akım Gerilim özellikleri

DA akım gerilim (I-V) özellikleri hem olduğu gibi alınmış hem de aşındırmadan geçirilmiş örnekler için ölçülmüştür. Şekil 2, optotristörün tipik DA I-V özelliğini göstermektedir. Genil ileri engelleme gerilimi (V[^]) olduğu gibi alınmış örneklemeler için karanlıkta sızıntı akımı 5 μ A olmak üzere 600 V çıkmıştır. Aşındırılmadan geçirilmiş örneklemeler için ise genil ileri engelleme gerilimi karanlıkta sızıntı akımı 12 μ A olmak üzere 800V'un üzerine çıkmıştır. Genil ileri engelleme gerilimindeki bu artış, engelleme kapasitesinin kenar-yüzey kalitelerine bağlı olduğunu göstermektedir.

Opto tristörün ileri engelleme gerilimi baz bölgesinde banttan banta çığ yıkımı ve engel katmanları içinden darbe geçişleri nedeniyle yıkım gerilimi ile karşılaştırılabilir. GaAs etki iyonizasyon katsayısı için Bulman'ın vd. [7] elde ettiği deneysel ifadeler şöyledir:

$$(1)cx=Aexp(-(B/E)^n),$$

$$A = 2.6 \times 10^{15} \text{cm}^{-1}$$

$$B = 6.7 \times 10^5 \text{V/cm}$$

$$n = 1.68$$

ve E elektrik alan olmak üzere.

Sonucun kesinliğini kaybetmeden, işlemleri basitleştirmek amacıyla elektron ve boşluklar için çarpma etki iyonizasyon katsayısı eşit alınmıştır. Bundan dolayı, yukarıdaki değiştirgenler elektron ve boşlukların etki iyonizasyon katsayı değiştirgenlerinin ortalamasını ifade etmektedir ve aynı yapıda ifade kullanan diğer yayınlanmış değiştirgelerden çok farklı değildir [1], [8]

İncelenen yapı için elektrik alanın ters beslenmiş p-i-n baz yapısının yarı yalıtkan katmanı boyunca sabit olduğu ve etki iyonizasyonunun bu katmanda olduğu varsayılmıştır. Bu sayede, çığ yıkım kriteri şu hale indirgenmiştir:

$$(2) \quad f^{wi} \quad a \text{ da, } W = 200 \mu\text{m}$$

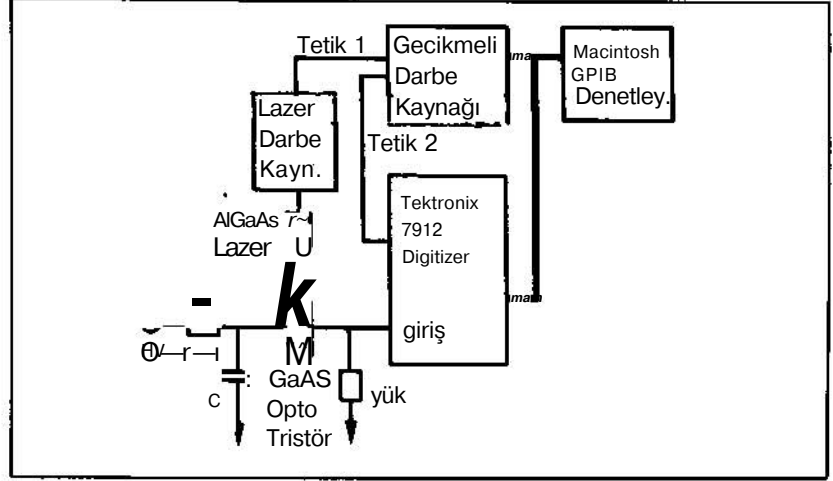
(μm = baz katmanının kalınlığı)

a, (1) eşitliğinde verildiği gibi olmak üzere. (2)'nin hesaplanması çığ yıkımını $V = 3734 \text{V}$ olarak verir. Transistor etkisi şu şekilde işlemlere katılır [9]:

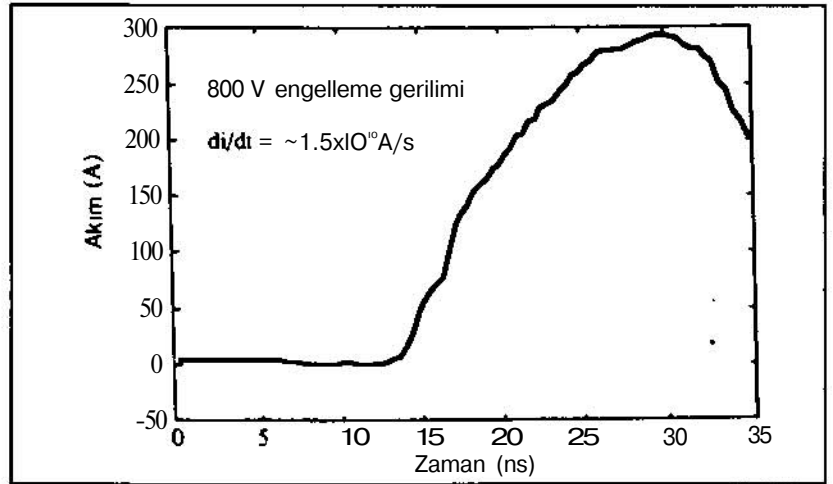
$$V_r / V_{br} = [1 - (a_1 + \langle x_2 \rangle)]^{1/n}, \quad V_r \text{ aygıtın gerçek yıkım gerilimi};$$

a_v 04 transistörlerin transfer katsayıları, n: malzemeye bağlı değiştirgen olmak üzere.

Logan'ın vd. [10] kullanımını esas alarak GaAs için $n = 3.5$, azınlık taşıyıcı difüzyon uzunluğu olarak 10^{-7}cm^3 , engel katmanları için $L = 1 \mu\text{m}$ kullandık [11]. Bu değerlerle, aygıt yıkım gerilimini $V_r = 2740 \text{V}$ olarak hesapladık.



ŞEKİL 3 - GaAs opto - tristörün anahtarıma özelliğini ölçmek için kullanılan devrenin şematik çizimi. -80 ns darbe genişliği, 848 nm dalga boyu, -2yul darbe enerjisi olan bir AlGaAs lazer diyotu opak kapılama kaynağı olarak kullanılmıştır.



ŞEKİL 4 - GaAs opto - İristir ile anahtarımtış tipik bir akım darbesi profili, engelleme gerilimi 800 v. Depo kapasitansı 4 nF, yük direnci 5 mü

GaAs opto tristörün ölçülen engelleme gerilimi hesaplanan değerden çok küçüktür. Bu erken yıkımın olası iki etkinin birinden kaynaklandığını düşünüyoruz: derin seviye etkisi ve kenar yıkımı. Derin seviye etkisi, yarı yalıtkan GaAs malzemelerdeki yüksek yoğunluklu Cr derin seviyelerinden kaynaklanabilir. Bu derin seviyeler taşıyıcı tuzakları olarak davranabilir ve yakalanmış olan taşıyıcılar banttan banta etki iyonizasyonu için gerekenden daha düşük elektrik alan seviyelerinde iyonize olabilirler. Bu derin seviyeler baz katmanından taşınan

taşıyıcılar için, taşıyıcıların ömrünü kısaltan, birleşme merkezleri olarak da davranabilir. Ömürdeki bu azalma tristörün ileri gerilim düşüşünü artıracaktır.

Ancak, düşük engelleme gerilimi için daha olası bir ihtimal kenar yıkımıdır. Genil engelleme geriliminin üzerindeki gerilimlerde, aygıt yıkımdan daha sonra geri dönüşü olası olmayan hasarlara uğramıştır. Bu aygıtların kenarları aşındırıldığında veya kesildiğinde de aygıt yüksek gerilim altında kalmıştır. Bu aygıtın kenarlarda veya kenarların yakınlarında kalı-



cı yıkımlara uğradığını gösterir. Bu nedenle bu tip aygıtlarda kenar yıkımlarının engelleme gerilimi için sınırlayıcı mekanizma olduğu sonucuna varılmıştır. Eklem yakınlarında yüzey yük yoğunluğu belirgin seviyelere ulaşmaya başladığında, eklem yıkımı kenar yıkımı ile oluşacaktır ve kütle yıkımından daha düşük olacaktır [13]. Optik tetikleme işareti aygıtın kenarlarına yöneltildiğinden kenarda veya kenar yakınlarında foto çığ etkisi oluştuğunda da ek bir kenar etkisi ortaya çıkacaktır.

Ters engelleme gerilimi Şekil 2'de gösterildiği gibi 100 Vun altındadır. Bu düzenlemede iki pn eklemi, p+ emitör ve n engel katmanları ve p engel ve n+emitör katmanları, ters beslenmiştir. Bu katmanlar yoğun katlandığından, tünel yıkımının, çığ yıkımının oluşmasından önce, düşük gerilimlerde (10 Vun altında) oluşması beklenmiştir. Bundan dolayı, bu tünel yıkım geriliminden daha yüksek gerilimler için, engel ve emitör katmanları temas katmanları olarak görev yapar ve yarı yalıtkan baz katmanının etkisi altında IV özelliği ileri beslenmiş p-i-n diyota benzer. Şekil 2'deki IV özelliğinin asimetrisi eklem, aygıtın çalışmasında önemli bir rol oynadığını gösterir.

IV. Darbeli Güç Anahtarlama Özelliği

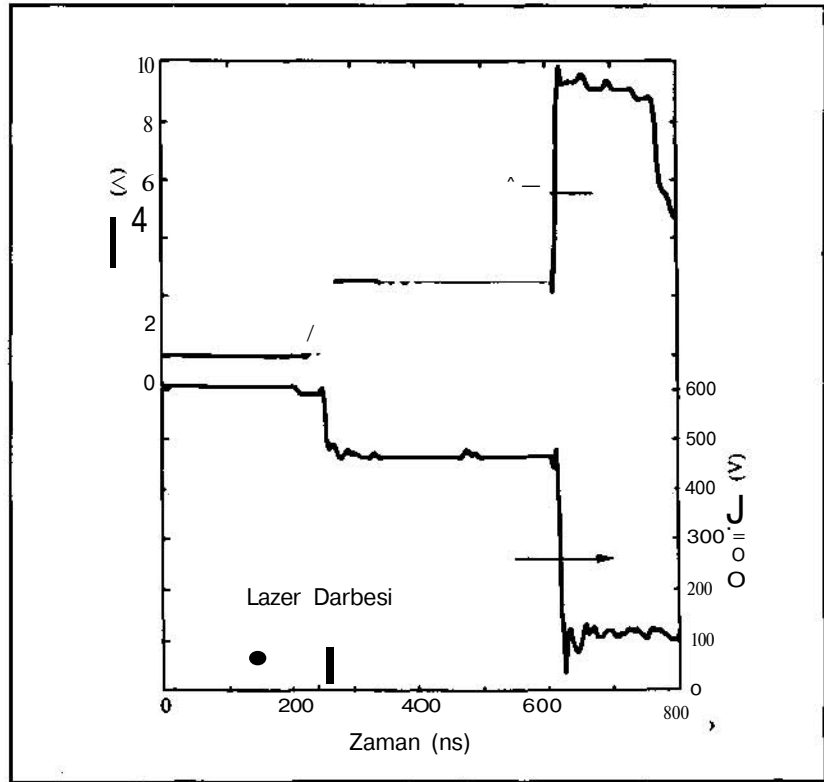
Şematik olarak şekil 3'de gösterilmiş olan kapasitif boşalma devresi ile opto tristörün anahtarlama özelliği ölçülmüştür. Darbeli akımın di/dt oranını sınırlayacak indüktans azaltmak için tasarım sırasında dikkatli davranılmıştır. Akımı görüntülemek ve yük görevini yapması için 5mQ düşük indüktanslı akım görüntüleme direnci kullanılmıştır. Ölçüm düzeneğinde enerji depolama aygıtı olarak 4nF düşük indüktanslı disk kapasitör kullanılmıştır.

Opto tristör AlGaAs laser diyotla optik tetiklenmiştir. Laser çıkış penceresi aygıtın kenarından 5 mm uzağa yerleştirilmiştir. Laser diyot tek darbe modunda 1-2uJ laser darbe enerjisinde ve -80

ns darbe genişliğinde çalıştırılmıştır. Tepe dalgaboyu 848nm olmuştur.

Şekil 4 opto tristör anahtarlama tipik bir akım darbesini göstermektedir. 800 V engelleme geriliminde di/dt oranı -1.5×10^{10} A/s olmak üzere anahtarlama akımın tepe değeri yaklaşık 300A olmuştur. Şekil 4'ün çözümlemesi seri RLC devresinde indüktansın ~ 30 nH olduğunu göstermektedir. $C=4$ nF ve $L=30$ nH olduğunda -300A tepe akımını elde etmek için devredeki direnç değerinin 0.5i2'dan daha düşük olması gerekir. Bu, aygıtın etkin direncinin 0.5ü'dan daha az olduğunu gösterir.

Aygıtın anahtarlama işleminin iletim fazında ileri yöndeki düşüşünü belirlemek amacıyla deneme devresindeki kapasitör 50Q,



ŞEKİL 5 - GaAs opto trisBrie anahtarlama PFN'de tipik akım (üst eğri) ve gerilim (alt eğri) proBerli. PFN oluşturmak için seki Steki kapasitör 50 O, 260 ns gecikme kablosu ile değiştirilmiştir. Aygıt, Hk ince 350 ns kadar -15 A iletmış, sonra daha yüksek akım seviyesine, ~9A, çıkarılmıştır. Yüksek akım Helen durumunda, aygıt üzerindeki gerilim ~100 Vtr.

260ns geciktirme kablosuyla darbe oluşturucağı yapı (PFN-Pulse Forming Network) oluşturmak için değiştirilmiştir. Tektro-nix yüksek gerilim probu (P6015) ise aygıt üzerindeki gerilimi doğrudan görüntüleyebilmek için kullanılmıştır. PFN ileri yöndeki düşüş ölçümünde geçiş süresi etkilerini azaltır. Burada kullanılan 50Q PFN, akımı 600Vta 12A'e sınırlar. 300A aralığında düşüşü ölçmek için daha düşük dirençli PFN kullanılması gereklidir.

Şekil 5 akım görüntüleyici direnç ile ölçülen PFN'deki akım profilini ve proba ölçülen gerilimi göstermektedir. Aygıt ilk olarak düşük akım (-2.5A) durumunda anahtarı açmış, 350ns gecikmeden sonra daha yüksek akım seviyesine (~9A) çıkarılmıştır. Şekil 5'deki gerilim profili düşük akım durumunda gerilimin ~480V ve yüksek akım durumunda, baz bölgesinde ~5kV/cm elektrik alanına denk gelen bir gerilimle, -100V olduğunu göstermektedir. Bu alan, kütle yarı iletken GaAs için yüksek akım "kilitleme" koşullarında ölçülenlere eşittir, yani kalın baz bölgesi kütle GaAs'a benzer kilitleme özelliği gösterir.

Opto tristörün ileri yöndeki düşü-

şü, bu nedenle, yarı yalıtkan baz katmanının derin seviye etkileri altında olmalı ve daha yüksek akımlarda ~100V'tan fazla sapsamalıdır. Bu varsayım 300A'de etkin direncin ~0.3Q olacağı anlamına gelir. Bu değer seri RLC devresi ile daha önce elde edilen değere yakındır. Bu nedenle iletim fazında aygıt 100V'a kilitlenir ve akım değeri dış devre ile belirlenir.

Opto tristörün genil anahtarlama oranları Tablo-1'de özetlenmiştir. Tablo 1'deki elektrik alanların belirlenmesinde gerilimin tamamen baz bölgesi üzerinde olduğu varsayılmıştır. Metalik temasların nokta alanları akım yoğunluklarının belirlenmesinde kullanılmıştır.

V. özet ve Sonuçlar

Optik kapılanmış bir GaAs tristör özel olarak darbeii güç uygulamaları için, di/dt oranı üzerinde durularak geliştirilmiştir. Aygıtlar, yarı yalıtkan bir tabanın her iki tarafında MOCVD büyütülmüş epitaxial katmanlar uygulanarak üretilmiştir. Bu aygıtların darbeii güç anahtarları olarak özellikleri bu yazıda sunulmuş ve çözümlenmiştir. Parça olarak kesildikten sonra aşındırılmış aygıtlar

800Vtan daha yüksek gerilimleri engellemeyi ve 300A kadar yüksek tepe akımlarını iletmeyi başarmışlardır. Bu aygıtlar için di/dt oranı 1.5×10^{10} A/s'den daha iyidir. Kenar yıkımları engelleme gerilimini ve aygıt ömrünü sınırlamaktadır. İleri yönde düşüş ~100V civarında olmuştur ve bunun aygıtın kalın baz bölgesinde oluşan kilitlenme etkisiyle belirlendiğine karar verilmiştir.

Aygıtın engelleme geriliminin kütle çığ yıkım gerilimi ile belirlenmesini sağlayacak şekilde kenar yıkım etkilerinin azaltılmasına yönelik incelemelerin yapılması gereklidir. Gelecekteki çalışmalar aygıtın bir koruma halkası kullanılarak kenardan ayrı tutulması ve yüzeyin pasifleştirilmesi ve kenarlarda oluşan elektrik alanların azaltılmasını içerecektir. Yüksek akım seviyelerindeki temas noktası sorunları ve diğer hata mekanizmaları da incelenecektir.

İleri yönde büyük düşüşlere yol açan "kilitleme" etkisi nedeniyle yarı yalıtkan GaAs, opto tristörler için uygun olmayabilir. Bu nedenle saf ($10^{13} - 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) ve kalın (200-300µ.m) katmanların tristör baz bölgesi olarak kullanılmak için epitaxial büyütülmesi üzerinde durulmaktadır. Sıvı faz epitaksi (LPE- Liquid Phase Epitaxy) bu amaca en uygun teknoloji olarak görünmektedir. LPE, çözelti kabından kaynaklanan kirlenmeyi azalttığı için önemli olan düşük sıcaklıkta büyümeye olanak tanır.

Bu yazıda sunulan sonuçların, GaAs tabanlı opto-tristörlerin darbeii güç aygıtları olarak kullanılmak için önemli bir potansiyel oluşturduğunu gösterdiği ve optoelektronik özelliklerin tristör anahtarlama di/dt kapasitesini önemli ölçüde arttırabileceği sonucuna vardık.

Tipik optik kapı lama enerjisi	1-2 µJ
DA engel gerilimi	> 800 volts
Engel durumunda elektrik alan	> 400 KV/cm
İleri yönde düşüş	-100 volts
iletim durumunda elektrik alan	-5 KV/cm
800 Vta tepe darbe akımı	-300 A
Tepe akım yoğunluğu	-37.5 KA/cm ²
di/dt	> 1.5 x 10 ¹⁰ A/s

Tablo 1 - GaAs opta tnstörün Genil Darbeii Güç Anahtarlama oranları: (elektrik alanın belirlenmeside, besleme geriliminin 200 mm baz kalmanı üzerinde olduğu kabul edilmiştir. Temaslann nokta atanları (~ 0.008 cm²) akım yoğunluğunu belirlemede kullanılmıştır.)