

## Faz Değişimli Malzemeler için Yüksek Hızlı Elektriksel Ölçüm Tekniği

Faruk Dirisağlık<sup>1\*</sup>, Ali Gökırmak<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü / Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye

<sup>2</sup>Electrical and Computer Engineering Department / University of Connecticut, Storrs, CT, USA

\*Corresponding author&Speaker: [fdirisaalik@ogu.edu.tr](mailto:fdirisaalik@ogu.edu.tr)

Presentation/Paper Type: Oral / Full Paper

**Özet** – Faz değişimli malzemeler, kristal yapıları sıcaklığa bağlı olarak değişen, kristal ve amorf fazlarında elektriksel ve optik özelliklerinde büyük farklılıklar gösteren malzemelerdir. Günümüzde, başta Flash ve DRAM hafıza teknolojilerine alternatif olarak görülen faz değişimli hafıza aygıtları (Phase Change Memory: PCM) olmak üzere, CD-RW, DVD-RW, Blu-Ray gibi optik depolama aygıtları, ekran, sensor, RF uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu malzemeler kristal fazında düşük elektriksel direnç ve yüksek optik yansıtma, amorf fazında ise yüksek elektriksel direnç ve düşük optik yansıtma özelliği göstermektedir. Uygulanan kısa süreli (nanosaniye seviyesinde) elektriksel sinyaller ile ya da optik olarak lazer darbeleri ile iki yönlü faz geçişi sağlanabilmektedir. Bu malzemelerin karakterizasyonunda kullanılan hızlı lazer ölçüm teknikleri malzemenin optik özelliklerini açığa çıkarıp elektriksel özelliklerini ölçmemektedir. Ayrıca bu ölçümler aygıt büyüklüklerine nazaran çok daha büyük yüzeyler gerektirmektedir (~500 nm). Malzeme özelliklerinin faza göre değişkenlik göstermesi, yüksek hız ve yüksek operasyon sıcaklığı bu malzemelerin elektriksel karakterizasyonunu diğer katı hal elektronik malzemelerine göre zorlaştırmaktadır. Günümüzde yaygın olarak kullanılan elektriksel ölçüm teknikleri ise bu aygıtların operasyon hızına göre çok yavaş kalmakta ve operasyon esnasındaki yarı kararlı (metastable) durumdaki sıcaklığa bağlı elektriksel özelliklerini belirleyememektedir. Bu çalışmada faz değişimli malzemelerin kristal-amorf-kristal faz geçişleri esnasındaki sıcaklığa bağlı elektriksel özelliklerinin belirlenmesi ve kristalleşme süreçlerinin izlenmesi için yüksek hızlı ölçüm tekniği geliştirilmiştir. Bu çalışmayla yaygın olarak kullanılan yavaş elektriksel ölçüm tekniklerinden elde edilen sonuçlara kıyasla, yüksek hızlı uygulamalardaki çalışma koşullarına yakın bir ortam sağlanarak malzemenin daha gerçekçi elektriksel özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca elektriksel özelliklerin zamanla değişimi izlenerek malzemenin kristalleşme süreci, direncin zamanla kayması gibi konularda etkin elektriksel iletim mekanizmaları hakkında yaklaşımda bulunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler** – faz değişimli malzemeler; elektriksel karakterizasyon; kristalizasyon; direnç kayması; elektriksel iletim mekanizması.

### I. GİRİŞ

Faz değişimli malzemeler belirli sıcaklıkta eriyip katılaştıran, katı haldeyken atomlarının aldığı düzene göre kristal ve amorf fazlar arasında geçiş yapabilen, dolayısıyla elektriksel ve optik özelliklerinde büyük değişiklik gösteren malzemelerdir. Faz değişimi malzemeye uygulanan uygun lazer ya da elektrik darbeleri ile sağlanabilmektedir. Uzun yıllardır optik hafıza aygıtlarında (CD-RW, DVD-RW, Blu-Ray) kullanılan bu malzemeler uygulanan uygun lazer darbeleriyle yüksek optik yansıtma özelliğine sahip kristal fazından düşük optik yansıtma özelliğine sahip amorf fazına iki yönlü olarak geçiş yapabilmektedir. Bu malzemeler son zamanlarda elektriksel faz değişimli hafıza (PCM) aygıtlarında karşımıza çıkmaktadır. Nanometre boyuttaki kristal fazdaki malzemenin eritilip (~900 K) ardından çok hızlı bir biçimde tekrar katı hale geçirilmesiyle yüksek elektriksel dirençli amorf fazına ya da amorf malzemenin eritilmeksizin kristalleşme sıcaklığının (~425 K) hemen üstüne ısıtılmasıyla tekrar düşük elektriksel dirençli kristal fazına iki yönlü olarak geçiş sağlanabilmektedir. Boyutlarının küçüklüğü, hızlı olması ve bilgiyi kalıcı olarak saklama özelliği olan PCM aygıtları Flash ve DRAM hafıza aygıtlarına alternatif olarak ön plana çıkmaktadırlar. Ancak, bu aygıtlarda kullanılan faz değişimli malzemelerin özelliklerinin sıcaklığa ve fazlara göre değişkenlik göstermesi, malzemenin kısa süre de olsa yüksek

sıcaklıklara maruz kalması, bu malzemelerin karakterizasyonunu diğer katı yarıiletken malzemelere göre zorlaştırmaktadır. Ayrıca fazlar arasındaki geçiş özellikleri, kristalleşme süreci, direnç kayması ve bu malzemelerde hakim olan iletim mekanizmalarının anlaşılması önem arz etmektedir [1-5].

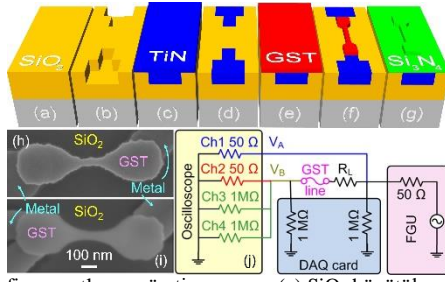
Bu malzemelerin optik karakterizasyonu büyük yüzeyler (~500 nm) üzerine lazer darbeleri uygulanıp, yansıtma özelliklerinin ölçülmesi yoluyla hızlıca yapılabilmektedir [4], [8]. Elektriksel karakterizasyonu ise tipik olarak yavaş DC akım-gerilim (I-V) ölçüm tekniğiyle (R-T), sıcaklığı kontrol edilebilen plaka üzerine malzemenin yerleştirilmesi ve sıcaklığın kontrollü olarak yükseltilmesiyle yapılmaktadır (genellikle 1 K/dakika). Ancak, bu teknikte malzemeler sıcaklık yükseldikçe yavaş yavaş kristalleşirler ve belli bir sıcaklıktan (~400 K) sonra amorf malzeme elektriksel olarak karakterize edilemez. Aygıtın altına yerleştirilmiş küçük ısıtıcılar kullanan diğer elektriksel ölçüm tekniği olan mikro katmanlı aygıtlar, tipik yavaş direnç-sıcaklık ölçüm tekniğinden hızlı olmasına rağmen hala fazlar arası geçiş hızına yaklaşmamaktadırlar [6-9].

Bu çalışmada faz değişimli hafıza aygıtlarında kullanılan bu malzemelerin farklı sıcaklıklardaki elektriksel özelliklerinin belirlenmesinde kullanılabilecek yüksek hızlı elektriksel karakterizasyon tekniği geliştirilmiştir. Bu teknik ile malzemelerin yüksek sıcaklıklarda hızla değişen fazına

rağmen direncindeki değişim anlık olarak ölçülebilmektedir. Bu sayede malzemenin yüksek sıcaklıklardaki amorf ve kristal fazlarındaki elektriksel özellikleri, fazlar arasında geçiş, kristalleşme ve düşük sıcaklıklarda gözlenen direnç kayması süreçleri incelenebilmiştir [10].

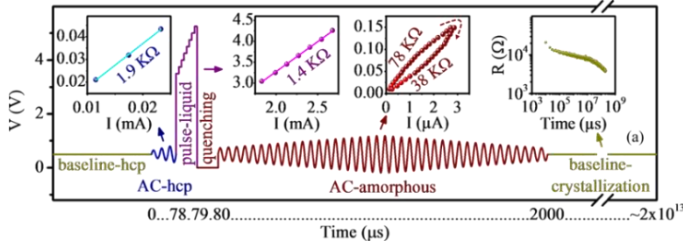
## II. MATERYALLER VE YÖNTEM

Faz değişimli hafıza aygıtlarında kullanılan en yaygın malzeme  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  (GST)'dir. Ölçümlerde kullanılan çizgi şeklindeki aygıt hücreleri bu malzemenin üretilmiştir. Ölçümler kriyojenik prob istasyonu içinde, yüksek vakum altında ( $10^{-5}$  torr), değişken sıcaklıklarda (300-675 K sıcaklık aralığında) yapılmıştır. Sıcaklık kontrolü için kriyojenik sıcaklık kontrolörü ile  $<0.5$  K çözünürlüğe sahip E-tipi termokupl sensörü kullanılmıştır [11].



Şekil 1. Hafıza aygıtlarının üretim şeması: (a)  $\text{SiO}_2$  büyütülmesi, (b) çukur açılması, (c) TiN (ya da W) doldurulması, (d) yüzey düzleştirme, (e) GST ince film kaplanması, (f) GST filmin şekillendirilmesi, (g)  $\text{Si}_3\text{N}_4$  film kaplanması. Aygıtların SEM görüntüleri: (h) üretilen fec ve (i) ölçülmüş. (j) ölçüm sisteminin şeması

Ölçümlerde Tungsten (W) prob uçları ile Titanyum Nitrid (TiN) (veya W) kontaklarına temas yapılmıştır. Prob uçlarından birine kapasitif deşarj ve gevşeme salınımindan kaçınmak için minimum kapasitif katkısı olan seri  $1 \text{ k}\Omega$  akım sınırlama direnci bağlanmıştır [12]. Rastgele sinyal üretici ünitesi (FGU) elektrik sinyalleri dizisini ( $1 \mu\text{s}$  amorflaştırma darbesi ile  $50 \text{ mV}$ 'luk sürekli bazal sinyal üzerine öncesinde ve sonrasında  $1 \text{ MHz}$  AC sinyallerinden oluşan  $2$  toplam  $\text{ms}$ 'lik sinyal dizisi) göndermek için programlanmıştır. Uygulanan voltaj ( $V_A$ ) ile aygıt ve  $1 \text{ k}\Omega$  direncin seri bağlı olduğu  $50 \Omega$  sonlandırma direnci ( $V_B$ ) üzerindeki gerilimi ölçmek için osiloskop kullanılmıştır. Ayrıca veri toplama kartı (DAQ) da  $100 \text{ S/s}$  örnekleme hızı ile aygıt üzerindeki bazal voltajı hızlı ölçüm öncesi ve sonrası dahil olmak üzere kesintisiz izlemek için kullanılmıştır. ( $\sim 3$ - $30$  dakika) (Şekil 1).

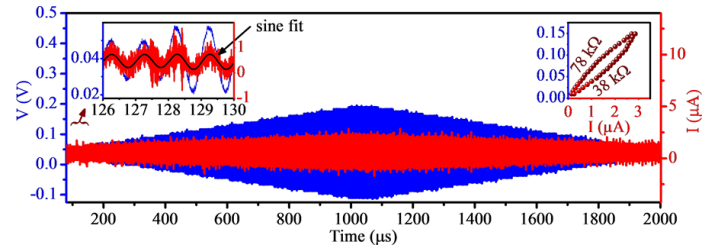
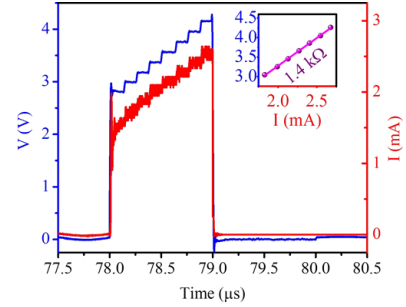
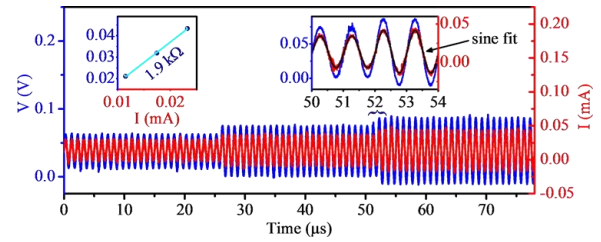


Şekil 2. Uygulanan dalga formunun şematik gösterimi. İç grafikler oluşturulan I-V karakteristiklerinden aygıt direncinin hesaplanmasını ve kristalleşme sürecinin izlenmesini göstermektedir.

Yüksek hızlı elektriksel ölçümler  $1 \text{ MHz}$  frekansında genlikleri kademeli artan ve ardından azalan sinüzoidal sinyal segmentleri, kademeli artan bir amorflaştırma darbesi (sıfırlama darbesi) ile bunları takip eden  $1 \mu\text{s}$  süreli dondurma sinyalini içeren dalga formu ile tek seferde gerçekleştirilmiştir [13]. Bu dalga formuna ek olarak aygıtları rahatsız etmeyecek,

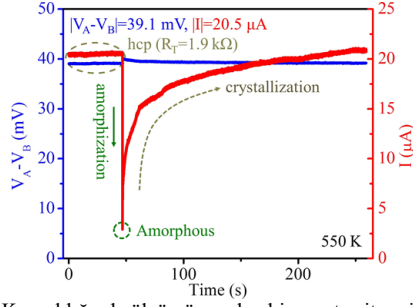
sadece amorflaştırma sinyali ardından  $1 \mu\text{s}$  süresince kesilen,  $50 \text{ mV}$ 'luk bazal voltajı uygulanmıştır (Şekil 2). Kademeli artan amorflaştırma darbe sinyali erimiş haldeki malzemenin direncini çıkarmak için kullanılmıştır. Sinüzoidal segmentler, başlangıçtaki kristal direncini, amorflastiktan sonraki amorf direncini ölçmek, kristalleşme ve direnç kayması sürecini izlemek için kullanılmıştır.

Amorf durumdaki tipik aygıt direnci oda sıcaklığında yaklaşık  $50 \text{ M}\Omega$  seviyesinde oldukça yüksektir. Bu nedenle akım sinyal-gürültü oranları çok düşüktür. Her bir AC segmentindeki ham veriler sabit fazlı ve frekanslı bir sinüzoidal sinyale fit edilip genlik değeri çıkarılmıştır. Bu ölçüm kilitli ölçüm tekniğine benzer bir ölçümdür [14]. Bu yaklaşım gürültüye bağlı rastgele hatalar, bilinmeyen ve değişken offset voltajları ve nicelendirme hataları gibi problemleri en aza indirmektedir.



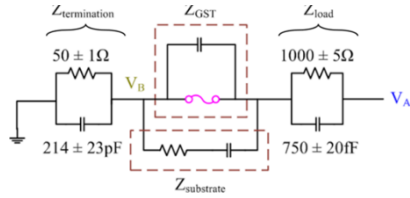
Şekil 3. Bir PCM aygıtına uygulanan ve ölçülen voltaj ve akımı gösteren elektrik sinyal dizisi örneği. İç grafikler belirlenen segmentlerin büyütülmüş hali ve oluşturulan I-V karakteristikleri olup kristal, sıvı ve amorf fazlardaki sinyalleri ve I-V karakteristiklerini göstermektedir.

Sinüzoidal fitlerden gelen genlikler ile I-V karakteristikleri oluşturulmuş ve eğimlerden aygıt direnci hesaplanmıştır. Amorflaştırma darbesinden sonraki sinüzoidal segmentlerin genlikleri hızlı ölçüm süresince aygıt direncindeki değişimi göstermesi ve herhangi bir histeris davranışı gösterip göstermediğini kontrol etmek için kademeli olarak artırılmış ve azaltılmıştır. Sıvı haldeki aygıt direnci yine kademeli artan adımlardan oluşan amorflaştırma darbesi esnasında oluşturulan I-V karakteristiklerinden hesaplanmıştır. Amorflaştırma darbesinin hemen ardından aygıtın sıvı halden tekrar katı hale geçebilmesi için  $1 \mu\text{s}$  süre boyunca hiçbir gerilim uygulanmamıştır (Şekil 3). Bu ölçümlerde  $25 \text{ nA}$ - $5 \mu\text{A}$  arasındaki akım değerlerinin ölçülebileceği büyüklükte DC ve sinüzoidal sinyaller uygulanmıştır.



Şekil 4. 600 K sıcaklığında ölçümü yapılan bir aygıtta ait veri toplama kartı (DAQ) ile elde edilen voltaj ve akım karakteristiği.  $R_T$  aygıt direnci, kontak direnci, yük direnci ve aygıt dokunan metal kontaktların direncinin toplamından oluşmaktadır.

Hızlı ölçümlerin öncesinde ve sonrasında kesintisiz bazal voltaj aracılığıyla uzun süreli yavaş ölçümler yapılmış ve cihaz direncindeki değişim, kristalleşme süreci izlenebilmiştir (Şekil 4). Uygulanan bazal voltaj aygıt üzerinde herhangi bir ısınmaya sebep olmayacak kadar küçük (50 mV) seçilmiştir.



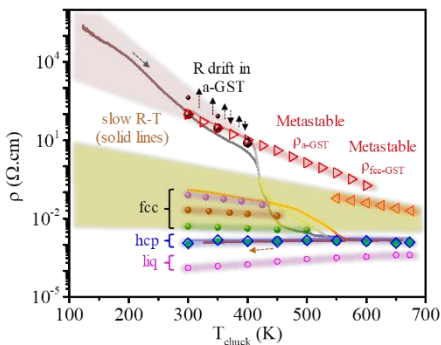
Şekil 5. Yüksek hızlı ölçüm tekniği ile aygıt dirençlerinin hesaplanmasında kullanılan devre modeli.

Aygıt dirençlerinin hesaplanmasında Şekil 5' de gösterilen devre modeli kullanılmıştır. Ölçümlerde kullanılan kabloların endüktansları ihmal edilecek kadar küçüktür. Toplam empedans (gerçek ve kompleks)  $V_A$  ve  $V_B$  uçları arasında düşen gerilimden hesaplanmıştır.  $V_A$  ve  $V_B$  üzerindeki ölçüm hataları çok küçük hesaplanmıştır. Toplam empedans bulunduktan sonra aygıt hücrenin empedansı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır:

$$Z_{GST} // Z_{substrate} = Z_{total} - Z_{load} - Z_{termination}$$

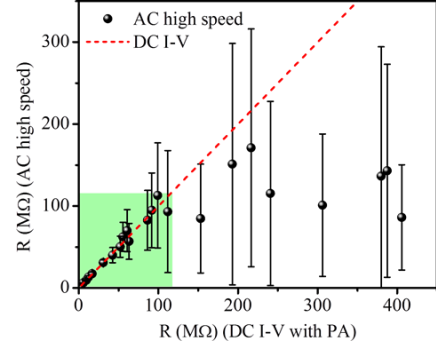
Altlık empedansı çok sayıda kırık aygıt hücrenin farklı sıcaklıklardaki ölçümlerinden aynı model kullanılarak hesaplanmıştır.

### III. BULGULAR



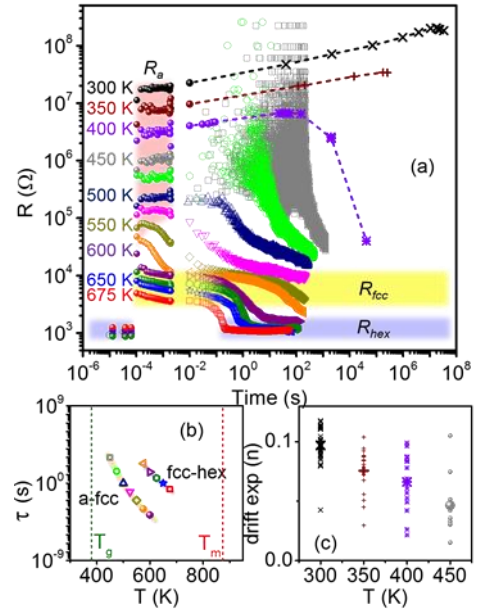
Şekil 6. Aygıt sıcaklığına bağlı elektriksel direnç değerleri. Kesintisiz çizgiler yavaş R-T ölçümlerini göstermektedir. Semboller sabit sıcaklıkta yapılan ölçüm sonuçlarını göstermektedir. Katı semboller yarı iletken parametre analizörü ile yapılan yavaş ölçümleri, açık semboller ise yüksek hızlı ölçümleri göstermektedir. Her bir veri yüksek sayıdaki ölçümün ortalamasını ifade etmektedir.

Bu teknikle gerçekleştirilen hızlı ölçümlerle  $\sim 425$  K sıcaklığının üstündeki amorf malzeme ve  $\sim 550$  K sıcaklığının üstündeki fcc kristal malzeme elektriksel özellikleri (öz direnç) belirlenmiştir. Şekil 6' da yüksek hızlı ölçüm ve yavaş R-T ölçüm sonuçlarını karşılaştırmaktadır. Ayrıca 2 ms süreli bu ölçüm tekniği ile malzemenin diğer kararlı olduğu ( $\sim 300$ - $425$  K arası amorf,  $\sim 300$ - $550$  K arası fcc,  $\sim 300$ - $675$  K arası hcp ve sıvı) fazlara ait elektriksel özellikleri de tek seferde belirlenmiştir.



Şekil 7. 300 K sıcaklığında farklı dirençlere sahip amorf aygıtların yüksek hızlı ölçüm ve yavaş ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması.

Şekil 7' de yüksek hızlı ölçüm sonuçlarının yarı iletken parametre analizörü ile yapılan çok hassas ancak yavaş ölçüm sonuçları ile karşılaştırılması verilmiştir. Geliştirilen ölçüm tekniği ve kullanılan hesaplama modeli ile oda sıcaklığındaki amorf fazındaki bir aygıtın  $\sim 110$  MΩ' a kadar olan dirençleri yavaş ölçüm sonuçlarıyla uyumlu olacak biçimde ölçülebilmektedir.



Şekil 8. Sıcaklığa bağlı elektriksel direnç, kristalleşme, direnç kaymasının izlenmesi. Katı semboller yüksek hızlı elektriksel ölçüm, açık semboller uzun süreli bazal voltaj yardımıyla yapılan ölçüm, kesikli çizgiler uzun süreli DC ölçüm sonuçlarıdır (a), sıcaklığa bağlı kristalleşme zamanları (b), sıcaklığa bağlı direnç kayması üssel değeri (c).

Şekil 8' de belirli bir sıcaklıktaki bir aygıt hücrenin yüksek hızlı ölçüm tekniğiyle başlangıçtaki kristal ( $0$ - $78$   $\mu\text{m}$ ), sıvı ( $78$ - $79$   $\mu\text{m}$ ) ve amorflaştırılmış ( $80$   $\mu\text{m}$ - $2$   $\mu\text{m}$ ) haldeki direnç değerleri gösterilmektedir (katı semboller). Takip eden ölçüm sonuçları bazal voltaj yardımıyla belirlenmiş ve aygıt hücrenin sıcaklığa bağlı olarak tekrar kristalize olma sürecini

dirençteki düşüş olarak göstermektedir (açık semboller). Kesikli çizgiler ise yavaş DC lmler olup düşük sıcaklıklarda aygıt hücresinin direncinin bir süre arttığını sonrasında tekrar kristalize olmaya başladığını göstermektedir.

#### IV. TARTIşMA VE SONUÇ

Bu lm tekniğiyle malzemenin ~400 K üstündeki sıcaklıklardaki amorf ve ~550 K üstündeki sıcaklıklardaki fcc kristal direnc değerleri llebilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar önceden rapor edilmiş tipik yavaş direnc-sıcaklık (R-T) lm tekniğinden elde edilen sonuçlardan belirgin farklı olarak direncin üssel biçimde azalığını göstermektedir. Aygıt simülasyonunda bu sonuçların kullanılması, yavaş ölüm sonuçlarının kullanıldığı simülasyonlara göre daha gerceği olacak ve belirgin farklılıklar ortaya çıkaracaktır. Malzemedeki elektrik taşıyıcılarının başlangıçta oluşan kristal çekirdeğinde takılmasıyla iletimin azalığı (Coulomb blokajı), bu sebeple dirençte kayma gözlendiği, ardından sıcaklık etkisiyle zamana bağlı olarak kristal adacıklarının büyümesiyle blokajdan kurtulan taşıyıcıların tekrar iletim mekanizmasında aktif hale gecip iletimin artması yoluyla kristalleşme sürecinin başladığı ve çoğaldığı söylenebilir. Çok düşük sıcaklıklarda yapılacak taşıyıcı aktivasyonunun izlenmesine yönelik ölümlerle, kristalleşme süreci ve direnç kayması arasındaki ilişki daha belirgin gözlemlenebilecektir.

#### TEşEKKüR

Bu calisma kısmi olarak Amerika Birlesik Devletleri Enerji Bakanlığı Bilim ofisi tarafından DE-SC005038 numarası ile desteklenmiştir. Çalışmadaki katkılarında dolayı Connecticut Üniversitesi Nanoelektronik laboratuvarından Prof. Dr. Helena Silva, Gökhan Bakan, Sadid Muneer, Mustafa Akbulut, Nicholas Williams, Adam Cywar, Lindsay Sullivan, Zoila Jurado, Jonathan Rarey, Maren Wennberg, Adrienne King, Lingyi Zhang, Rebecca Nowak, ve IBM Watson Araştırma merkezinden Dr. Chung Lam'e teşekkr ederim.

#### KAYNAKA

- [1] S. Raoux, M. Wuttig and L. v. Pierson, Phase Change Materials: Science and Applications. *Springer Verlag*, 2008.
- [2] H. P. Wong, S. Raoux, S. B. Kim, J. Liang, J. P. Reifenberg, B. Rajendran, M. Asheghi and K. E. Goodson, "Phase Change Memory," *Proc. IEEE*, vol. 98, pp. 2201-2227, 2010.
- [3] M. Wuttig and N. Yamada, "Phase-change materials for rewriteable data storage," *Nat. Mater.*, vol. 6, pp. 824-832, 2007.
- [4] D. Lencer, M. Salinga and M. Wuttig, "Design Rules for Phase-Change Materials in Data Storage Applications," *Adv. Mater.*, 2011.
- [5] R. Simpson, P. Fons, A. Kolobov, T. Fukaya, M. Krbal, T. Yagi and J. Tominaga, "Interfacial phase-change memory," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 6, pp. 501-505, 2011.
- [6] T. Siegrist, P. Jost, H. Volker, M. Woda, P. Merkelbach, C. Schlockermann and M. Wuttig, "Disorder-induced localization in crystalline phase-change materials," *Nat. Mater.*, vol. 10, pp. 202-208, 2011.
- [7] M. H. R. Lankhorst, B. W. Ketelaars and R. Wolters, "Low-cost and nanoscale non-volatile memory concept for future silicon chips," *Nat. Mater.*, vol. 4, pp. 347-352, 2005.
- [8] G. W. Burr, P. Tchoulfian, T. Topuria, C. Nyffeler, K. Virwani, A. Padilla, R. M. Shelby, M. Eskandari, B. Jackson and B. Lee, "Observation and modeling of polycrystalline grain formation in Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>," *J. Appl. Phys.*, vol. 111, pp. 104308-104308-12, 2012.
- [9] R. G. D. Jayasingh, S. W. Fong, J. Lee, Z. Li, K. Chang, D. Mantegazza, M. Asheghi, K. E. Goodson and H. P. Wong, "Ultra-Fast Characterization of Phase-Change Material Crystallization Properties in the Melt-Quenched Amorphous Phase," *Nano Lett.*, vol. 14, pp. 3419-3426, 2014.
- [10] Faruk Dirisağlık, Gokhan Bakan, Zoila Jurado, Sadid Muneer, Mustafa Akbulut, Jonathan Rarey, Lindsay Sullivan, Maren Wennberg, Adrienne King, Lingyi Zhang, Rebecca Nowak, Chung Lam, Helena

- [11] Lakeshore, "Lakeshore 336 cryogenic temperature controller", Available:<http://www.lakeshore.com/products/cryogenic-temperature-controllers/model-336/Pages/Overview.aspx>
- [12] G. Bakan, A. Cywar, H. Silva and A. Gokirmak, "Melting and crystallization of nanocrystalline silicon microwires through rapid self-heating," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 94, pp. 251910-251910-3, 2009.
- [13] K. Cil, F. Dirisağlık, L. Adnane, M. Wennberg, A. King, A. Faraclas, M. B. Akbulut, Y. Zhu, C. Lam and A. Gokirmak, "Electrical Resistivity of Liquid Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub> Based on Thin-Film and Nanoscale Device Measurements," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 60, pp. 433-437, 2013.
- [14] Stanford Research, "About Lock-In Amplifiers (Application Note #3)", Available:[http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Application\\_Notes/AboutLIAs.pdf](http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Application_Notes/AboutLIAs.pdf).