

Niyobyum İlavesinin (Bi, Pb)-2223 Bulk Süperiletken Sistemine Etkisi Üzerine Bir Araştırma

An Investigation on the Influence of Niobium Adding on (Bi,Pb)-2223 Bulk Superconducting System

Hasan AĞIL ^{*,1}

¹ Hakkari Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, 30000, Hakkari, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 08.06.2020 • Düzeltilerek geliş tarihi / Received in revised form: 18.09.2020 • Kabul tarihi / Accepted: 30.09.2020

Öz

Niyobyum (Nb) ilaveli $Bi_{1.85}Pb_{0.35}Sr_{1.9}Ca_{2.1}Cu_{3.1}O_{\delta}$ içeren bir dizi bizmut-tabanlı bulk süperiletken malzemeler, geleneksel katı hal reaksiyon yöntemi ile sentezlendi. Malzemelerin fazları ve mikro-yapısal analizi, X-ışını kırınımı (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile gerçekleştirildi. Niyobyum ilavesinin elektriksel ve manyetik özellikler üzerindeki etkisi, sırasıyla özdirenç ve mıknatıslanma ölçümleri ile belirlendi. Niyobyum ilavesiyle kritik sıcaklıkta önemli bir azalma olmadı. Ayrıca niyobyum ilave edilmiş malzemelerin oda sıcaklığı özdirenci, saf malzemeye kıyasla azaldı. Nb katkılı numunelerin kritik akım yoğunluk değerleri saf numuneninkinden daha düşüktür.

Anahtar kelimeler: Akı Çivilemesi, (Bi, Pb)-2223 Süperiletkeni, Kritik Akım Yoğunluğu, Nb_2O_5 Katkısı

Abstract

A series of bismuth-based bulk superconducting materials with niobium-added $Bi_{1.85}Pb_{0.35}Sr_{1.9}Ca_{2.1}Cu_{3.1}O_{\delta}$ were synthesized by the conventional solid state reaction method. The phases and microstructural analysis of the samples were carried out by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscopy (SEM). The effect of niobium addition on electrical and magnetic properties was determined by resistivity and magnetization measurements, respectively. There was no significant reduction in critical temperature by the addition of niobium. Also the room temperature resistivity of the niobium added samples decreased compared to the pristine sample. The critical current density values of the samples with Nb addition were lower than the pure sample.

Keywords: Flux Pinning, (Bi, Pb)-2223 Superconductor, Critical Current Density, Nb_2O_5 Addition

*a Hasan AĞIL; hasanagil@hakkari.edu.tr, Tel: (0438) 212 12 12, orcid.org/0000-0002-1574-3232

1. Giriş

Bi-Sr-Ca-Cu-O süperiletken ailesi (BSCCO), umut vaat eden teknik uygulamalar açısından birçok araştırma başlatmıştır. Özellikle Maeda tarafından keşfedilen Bi-2223 fazı, yüksek kritik sıcaklığı nedeniyle özelliklerinin iyileştirilmesi için birçok araştırmacı tarafından hala araştırılmaktadır (Maeda vd., 1988). Sistemdeki kimyasal yer değiştirmeler veya kimyasal katkılama çalışmaları, Bi-tabanlı bileşiklerde faz yapısının kökenini anlamak, yeni fazları sentezlemek ve süperiletkenlik mekanizmasını anlamak için önemlidir. Bi-2223 fazının üretimi sırasında diğer fazlar (Bi-2201 ve Bi-2212) da oluşabilir. Üç fazın tümü nedeniyle BSCCO, sistemin tek bir faz olarak oluşmasını önleyen benzer oluşum enerjilerine sahiptir (Grivel vd., 1996). Bi bölgesine kısmen Pb eklenerek Bi-2223 fazının kararlılığında önemli bir iyileşme gözlenmiştir (Grivel vd., 1996). Bi-2223 bulk malzemeler düşük kritik akım yoğunluğuna (J_c) sahip olmalarına rağmen, diğer yüksek sıcaklık süperiletkenlerine kıyasla iyi mekanik özellikleri ve kolay şekillendirilebilirliği ile en yüksek kritik sıcaklığa (T_c) sahiptirler (Rouessac vd., 1997). Bi tabanlı süperiletken malzemelerin uygulamalarındaki temel sınırlamalar, tanecik sınırlarındaki zayıf bağlar ve akı çivileme kabiliyetleridir (Cursino vd., 2009). Başlangıç stokiometrisi, başlangıç tozlarının saflığı ve boyutu, toz hazırlama koşulu, presleme basıncı, ısıtma işlem süreci ve katkı maddelerinin türü ve miktarı, parçacık bağlılığı ve akı çivileme yeteneğini önemli ölçüde etkiler. BSCCO'nun pratik uygulamalarda kullanımı için yüksek kritik akım yoğunluğu gerektiğinden, bu süperiletkenin süperiletken özelliklerini iyileştiren etkili yapay çivileme merkezlerinin oluşturulması önemlidir (Albiss vd., 2010; Zouaoui vd., 2008; Schneemeyer vd., 1987). Bu bağlamda, BSCCO süperiletkeninin kritik parametrelerini (kritik sıcaklık, kritik akım yoğunluğu, kritik manyetik alan, vb.) iyileştirmek için çok çaba sarf edilmiştir. Son zamanlarda, K, Eu, Tm_2O_3 , In_2O_3 , Ga_2O_3 , NiO, $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$, WO_3 , TiO_2 gibi nano boyutlu elementlerin, bileşiklerin ve oksitlerin etkisi, BSCCO'nun süperiletken özelliklerini iyileştirmek için kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır (Tran vd., 2019; Padam vd., 2019; Ülgen vd., 2018; de Vera vd., 2019; Guner vd., 2019; Harabor vd., 2019; Mohd Suib vd., 2019; Rahal vd., 2019; Ülgen vd., 2019). Nano parçacıkların tanecik-içi ve tanecik-arası bölgelerde etkin çivileme merkezleri olarak davrandıkları bulunmuştur (Ishii vd., 2000).

Bi-tabanlı yüksek sıcaklık süperiletkenleri için genel formül $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_{2n+4}$ olarak ifade edilebilir. Burada n, c eksenine dik farklı Cu-O düzlemleri için (n = 1, 2, 3) değerlerini alabilir. Fazlar genellikle, Bi-2201, Bi-2212, Bi-2223 olarak Bi:Sr:Ca:Cu bileşen elementlerinin atomik oranıyla, CuO_2 tabakalarının sayısına atıfta bulunarak n = 1, 2, 3 olarak belirtilir ve sırasıyla 20, 95 ve 110 K'lik süperiletken geçiş sıcaklıklarına sahip fazlardır (Gul vd., 2005).

Literatürde ayrıca Bi-tabanlı süperiletkenlere niyobyum ilavesinin veya katkısının etkileri ile ilgili çalışmalarda bulunmaktadır. Ancak bu çalışmalar ile bizim çalışmamız arasında hem malzeme hazırlama hem başlangıç bileşimi hem de gerçekleştirilen karakterizasyonlar arasında bazı farklılıklar bulunmaktadır. Ghazanfari vd. tarafından Nb ilavesinin BSCCO'nun süperiletken özelliklerine etkileri araştırıldı (Ghazanfari vd., 2007). Bu çalışmada tüm başlangıç tozları birlikte karıştırılmış ve ardından tozlar kalsine edilerek malzemeler pelet haline getirilmiştir. Bu çalışmanın, mevcut çalışmadan farkı malzeme hazırlama aşamasıdır. Bilgili vd. yaptığı çalışmada ise hem başlangıç bileşimi hem karıştırma işlemi hem de ısıtma işlem süreçleri açısından bizim çalışmamız ile arasında farklılıklar bulunmaktadır (Bilgili vd., 2014). Asghari vd. yaptığı başka bir çalışmada ise kurşundan (Pb) eksiltme yapılarak yerine niyobyum (Nb) katkısı yapılarak malzeme üretimi gerçekleştirilmiştir (Asghari vd., 2017).

Bu çalışmanın amacı, Nb ilavesinin Bi-2223 bulk malzemelerin çivileme mekanizması ve faz oluşumu üzerindeki etkisini araştırmaktır. Sonuç olarak, niyobyum ilavesinin faz hacim oranını arttırmak için Bi-2223 bulk süperiletkenleri üzerindeki olası rolü elektriksel, manyetik ve yapısal ölçümlerle araştırıldı.

2. Materyal ve Metod

Geleneksel katı hal reaksiyon yöntemi, $Bi_{1.85}Pb_{0.35}Sr_{1.9}Ca_{2.1}Cu_{3.1}O_8/(Nb_2O_5)_x$ bulk süperiletkenini üretmek için kullanıldı; burada x ağırlıkça 0,0, 0,1, 0,2, 0,5, 0,7 ve 1,0'dır. Bu malzemeler bundan sonra sırasıyla A, B, C, D, E ve F olarak adlandırılacaktır. Yüksek saflıkta başlangıç tozları (Bi_2O_3 (% 99,999), PbO (% 99,999), $SrCO_3$ (% 99,995), $CaCO_3$ (% 99,999) ve CuO (% 99,99)) stokiometrik orana göre hassas bir şekilde tartıldı ve bir agat havan içerisinde tokmak ile karıştırıldı ve öğütüldü. Toz karışımı daha sonra 12 saat boyunca hava ortamında sırasıyla 800 °C ve 820 °C'de bir kül fırında

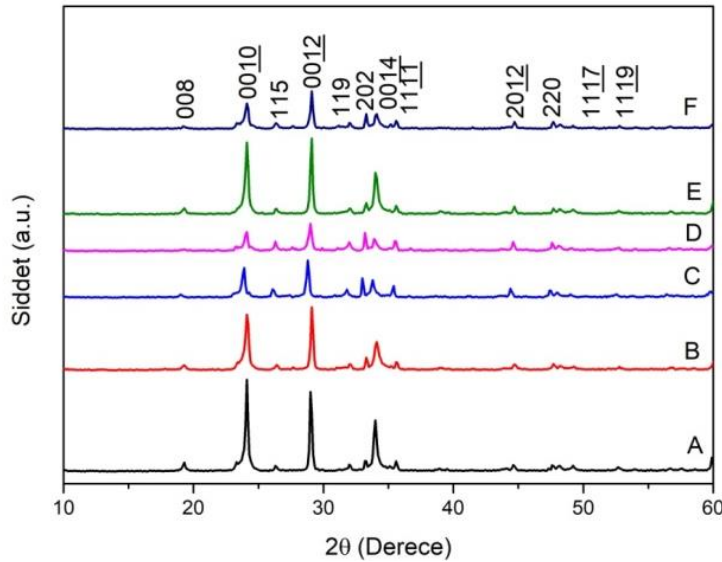
kalsine edildi. Bu karışım, kalsinasyon işlemleri sırasında agat havan ve tokmak ile ara öğütmeye tabi tutuldu. Bu işlemten sonra nihai toz karışımına ağırlıkça (toplam toz karışımının) % 0, 0,1, 0,2, 0,5, 0,7 ve 1 oranında niyobyum ilave edildi ve daha sonra 1 mm kalınlığında ve 13 mm çapında malzemeler 375 MPa basınç altında preslendi. Daha sonra tüm numuneler bir tüp fırın içerisinde hava ortamında 835 °C'de 40 saat sinterlendi. Nihai malzemeler, Bi-2223 faz hacim oranını, T_c ve J_c 'yi arttırmak için, yeniden öğütüldü ve 650 MPa basınç altında yeniden preslendi (Safran vd., 2017). Son olarak sinterleme işlemi bir tüp fırın içerisinde 835 °C'de 40 saat gerçekleştirildi.

Tüm örneklerin yapısal analizi ve faz tespiti X-ışını toz kırınım yöntemi (XRD) ile araştırıldı. Örgü parametreleri, X-ışını verilerindeki kırınım pikleri kullanılarak UnitCell programı ile hesaplandı. Örneklerin morfolojisini ve tanecik büyüklüğünü incelemek için tarama elektron

mikroskobu (SEM) kullanıldı. Elektriksel ve manyetik özellikler sırasıyla doğru akım (d.a.) direnç ve mıknatıslanma ölçümleri ile belirlendi. Bu ölçümler Quantum Design PPMS (fiziksel özellikler ölçüm sistemi) ile alındı. Kritik akım yoğunluğu Bean formülü ile hesaplandı (Cagliero vd., 2007).

3. Bulgular ve Tartışma

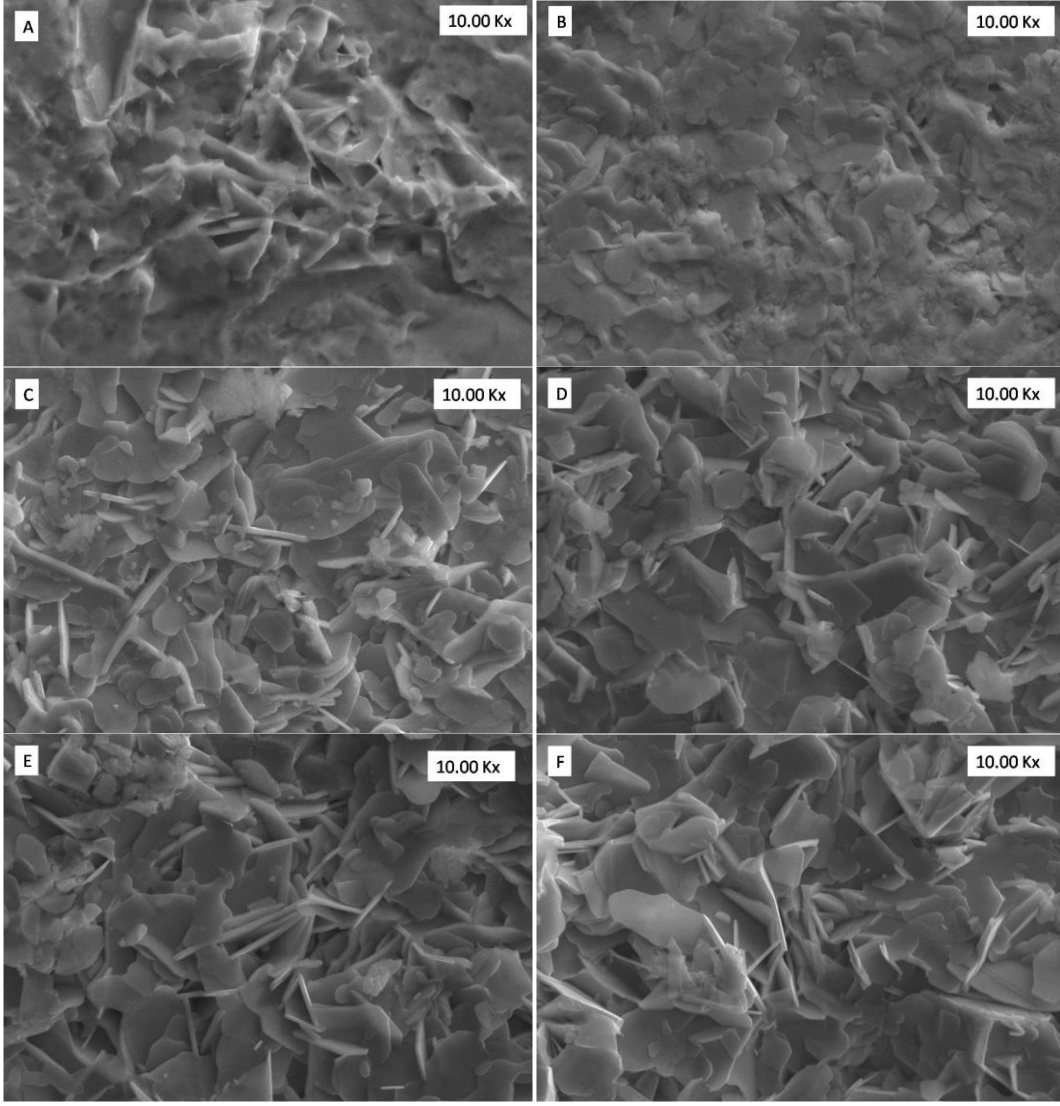
$Bi_{1.85}Pb_{0.35}Sr_{1.9}Ca_{2.1}Cu_{3.1}O_{\delta}/(Nb_2O_5)_x$ bulk süperiletkenlerin XRD desenleri Şekil 1'de gösterilmektedir. (hkl) Miller indisleri MDI Jade 6 programı kullanılarak belirlendi ve XRD piklerinde işaretlendi. Tüm örneklerin XRD desenlerinde tüm piklerin Bi-2223 fazına ait olduğu ve yabancı faz bulunmadığı gözlemlendi. Bu, malzeme üretim sürecinin başarıyla gerçekleştirildiğini gösterir. İndekslenmiş piklerin (hkl) değerinden hesaplanan örgü parametrelerinde, sistematik bir değişiklik yoktu. Bu değerler Tablo 1'de gösterildi.



Şekil 1. (Bi, Pb)-2223 + ağırlıkça % x Nb₂O₅ bulk süperiletkenlerin XRD desenleri.

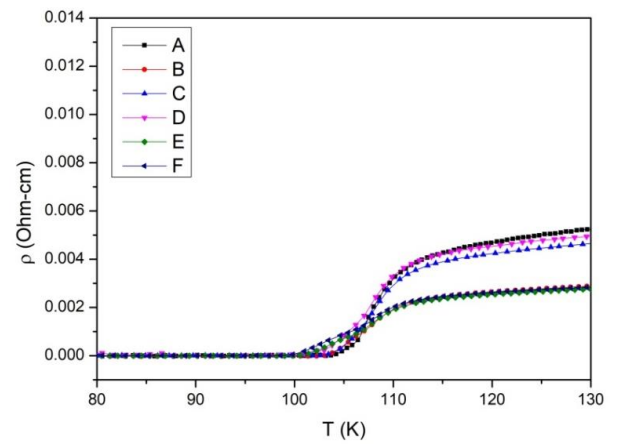
Tanecik yapısı, yüksek sıcaklık süperiletkenlerin en önemli özelliklerinden birisidir (Silver vd., 2002). Örneklerin mikro yapısı, yüzey morfolojisi ve tanecik yapısı SEM görüntüleri ile incelendi. İkincil elektron (SE) görüntüleme ve 10000 büyütme kullanıldı. Şekil 2, $Bi_{1.85}Pb_{0.35}Sr_{1.9}Ca_{2.1}Cu_{3.1}O_{\delta}/(Nb_2O_5)_x$ bulk süperiletkenlerin SEM görüntülerini göstermektedir. Plaka benzeri bir parçacık morfolojisi, (Bi, Pb)-2223 sisteminde artan Nb ilavesiyle artar. Görüntülerde görüldüğü gibi

yüzey morfolojisi, (Bi, Pb)-2223 sisteminde artan Nb ilavesiyle değişir. Plaka benzeri tanecik morfolojisi, ağırlıkça % 0,5 Nb ilavesinden sonra gözlemlendi. Öte yandan, katkılı malzemelerin tanecik büyüklüğünün ve plaka kalınlığının, artan Nb ilavesi miktarıyla azaldığı gözlemlenmektedir. Artan Nb miktarı ile tanecikler keskin kenarlara ve köşelere sahip olmaya ve daha ince bir yapıya kavuşmaya başladı. Parçacıklar mikro yapıda rastgele dağıldı.



Şekil 2. Tüm malzemelerin SEM görüntüleri.

Niyobyum ilavelerinin, numunelerin geçiş sıcaklıkları üzerindeki etkilerini anlamak için $T = 10-300$ K aralığında elektriksel özdirenç ölçümleri yapıldı. $\text{Bi}_{1.85}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_{2.1}\text{Cu}_{3.1}\text{O}_{8}/(\text{Nb}_2\text{O}_5)_x$ bileşikleri için elektrik özdirencinin ($\rho(T)$) sıcaklık bağımlılığı Şekil 3'te gösterilmektedir. Tüm numuneler geçiş sıcaklığının üzerinde metalik davranış gösterir. Saf (Bi, Pb)-2223 ile karşılaştırıldığında, oda sıcaklığı özdirencinin (ρ_0) niyobyum miktarındaki artışla azaldığı açıktır. Numunelerin $T_{c,\text{başlangıç}}$ (normal durum direncinden ilk sapma ile tanımlanır (Yamamoto vd., 2015)) değerleri neredeyse değişmezken, niyobyum miktarındaki artışla $T_{c,\text{sıfır}}$ (sıfır direnç kritik sıcaklığı ile tanımlanır (Yamamoto vd., 2015)) değerleri azalır. Bu nedenle, geçiş genişliği (ΔT_c) de niyobyum miktarındaki artışla azaldı (Yamamoto vd., 2015). Tablo 2'de tüm malzemeler için bu parametreler verildi.



Şekil 3. $\text{Bi}_{1.85}\text{Pb}_{0.35}\text{Sr}_{1.9}\text{Ca}_{2.1}\text{Cu}_{3.1}\text{O}_{8}/(\text{Nb}_2\text{O}_5)_x$ bileşikleri için sıcaklığa karşı elektriksel özdirenç.

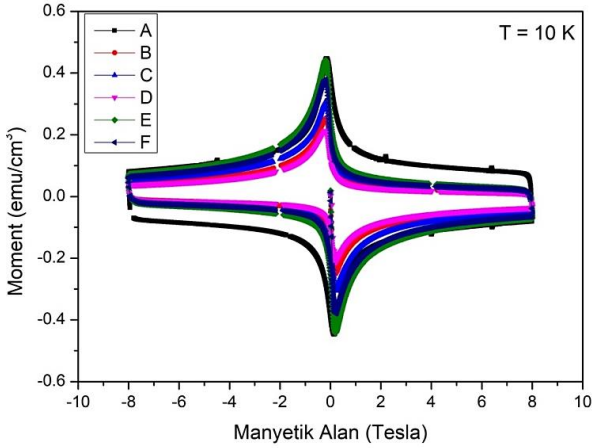
Tablo 1. Nb katkılı (Bi, Pb)-2223 bileşikleri için örgü parametreleri.

Ağırlıkça % x	a (Å)	c (Å)
0	5.41084	36.69625
0.1	5.39966	36.63906
0.2	5.43361	36.86053
0.5	5.41112	36.71241
0.7	5.39825	36.70500
1	5.39944	36.66236

Bi_{1.85}Pb_{0.35}Sr_{1.9}Ca_{2.1}Cu_{3.1}O₈/(Nb₂O₅)_x bileşiklerinin mıknatıslanmasının manyetik alan bağımlılığı Şekil 4'te gösterilmektedir. Mıknatıslanma ölçümleri (M-H) T = 10 K ve H = ± 8 Tesla'da gerçekleştirildi. Niyobyum miktarındaki artışla, eğrilerin genişliğinin azaldığı açıktır. Histerezis eğrisinin genişliğinin azalması kristal boyutu ve yüzeyde kusur birikimi ile açıklanabilir (Kishio vd., 1991).

Tablo 2. Nb katkılı (Bi, Pb)-2223 bileşikleri için kritik parametreleri.

Ağırlıkça % x	T _{c,başlangıç} (K)	T _{c,sfır} (K)	ΔT _c (K)	ρ ₀ (Ohm-cm)	B (T)	J _c (A/cm ²)
0	111.36	104.83	6.53	0.01123	8 0	6.5 x 10 ³ 3.2 x 10 ⁴
0.1	110.89	103.08	7.81	0.00867	8 0	4.2 x 10 ³ 2.1 x 10 ⁴
0.2	110.51	100.26	10.25	0.00944	8 0	2.9 x 10 ³ 1.3 x 10 ⁴
0.5	110	100.26	9.74	0.00533	8 0	5.7 x 10 ³ 3.1 x 10 ⁴
0.7	110	100.26	9.74	0.0051	8 0	5.3 x 10 ³ 2.5 x 10 ⁴
1	110.86	103.00	7.86	0.00435	8 0	3.4 x 10 ³ 1.8 x 10 ⁴



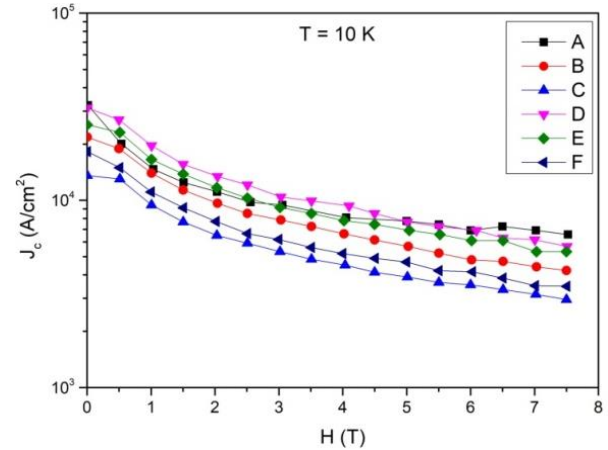
Şekil 4. Bi_{1.85}Pb_{0.35}Sr_{1.9}Ca_{2.1}Cu_{3.1}O₈/(Nb₂O₅)_x bileşikleri için M (H) histerezis eğrileri.

J_c değerleri Bean modeli kullanılarak M(H) eğrilerinin genişliğinden aşağıdaki eşitlikle hesaplandı (Bean, 1962):

$$J_c = \frac{20 \Delta M}{a \left(1 - \frac{a}{3b}\right)} \quad (1)$$

burada ΔM manyetik histerezis döngülerinin genişliği, a ve b ise numunenin kesit boyutlarıdır (a < b). Şekil 5, Bi_{1.85}Pb_{0.35}Sr_{1.9}Ca_{2.1}Cu_{3.1}O₈/(Nb₂O₅)_x bileşikleri

için J_c'nin uygulanan manyetik alan bağımlılığını gösterir. Niyobyum ilavesi ile manyetik alana bağımlılığın azaldığı açıktır. Saf (Bi, Pb)-2223 numunesinin, niyobyum katkılı numunelerden daha yüksek J_c değerlerine sahip olduğu gözlemlendi. Bunun sebebinin malzemeye eklenen safsızlıklar ile uygulanan manyetik alanın numuneye nüfuz etmeye başlaması ve dolayısıyla kritik akım yoğunluğunun azalmasına yol açtığı düşünülmektedir (Bilgili vd., 2017). Bu sonuçlar akı çivileme özelliklerinin niyobyum ilavesiyle bozulduğunu göstermektedir (Bilgili vd., 2017).



Şekil 5. T = 10 K'da Bi_{1.85}Pb_{0.35}Sr_{1.9}Ca_{2.1}Cu_{3.1}O₈/(Nb₂O₅)_x bileşikleri için uygulanan manyetik alana karşı J_c değişimleri

4. Tartışma ve Sonuçlar

Bu çalışmada, niyobyum ilavesinin (Bi, Pb)-2223 bileşiklerinin yapısal, morfolojik, elektriksel ve manyetik özellikleri üzerine etkileri araştırıldı. XRD analizi ağırlıklı olarak tek fazlı tetragonal (Bi, Pb)-2223 fazını gösterir. Yüzey morfolojilerinin niyobyum ilavesiyle değiştiği gözlemlendi. Süperiletken geçiş sıcaklıklarının niyobyum ilavesiyle değişmediği, ancak geçiş genişliklerinin arttığı bulundu. Katkı miktarı arttıkça normal durum direnci azaldı. M(H) sonuçlarının analizi, kritik akım yoğunluğu değerlerinin azaldığını gösterir. Bu, numunelerin akım taşıma kapasitesinin, az miktarda niyobyum ilavesiyle bozulduğu anlamına gelir.

Teşekkür

Bu çalışma Hakkari Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından FM19AYP1 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Albiss, B.A., Obaidat, I.M., Gharaibehb, M., Ghamlouche, H. ve Obeidat, S.M., 2010. Impact of Addition of Magnetic Nanoparticles on Vortex Pinning and Microstructure Properties of Bi-Sr-Ca-Cu-O Superconductor. *Solid State Communications*, 150, 1542-1547.
- Asghari, R., Arslan, L.C., Sedghi, H. ve Naghsara, H., 2017. Synthesis and Characterization of Nb Substitution on (Bi-Pb)-2223 Superconductors. *Journal of Low Temperature Physics*, 189, 15-26.
- Bean, C.P., 1962. Magnetization of Hard Superconductors. *Physical Review Letters*, 8, 250.
- Bilgili, O. ve Kocabaş, K., 2014. Effect of Nb Addition on Magnetic, Structural and Superconducting Properties of (Bi, Pb)-2223 Superconductors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 25, 2889-2897.
- Cagliero, S., Agostino, A., Bonometti, E. ve Truccato, M., 2007. Electrical Transport Effects due to Oxygen Content Modifications in a $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Superconducting Whisker. *Superconductor Science and Technology*, 20, 667.
- Cursino, E., Schmool, D.S., Garitaonandia, J.S. ve Rodrigues, D., 2009. Artificial Pinning Center Studies in Bi2212 Tapes and Bulks With Zirconium Oxide Inclusion. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 19(3), 3516-3519.

- de Vera, F.I., Bardolaza, H., Arcilla, C. ve Sarmago, R., 2019. Effect of In_2O_3 on the Grain Connectivity and Superconducting Behavior of $\text{Bi}_2\text{Sr}_{2-x}\text{In}_x\text{CaCu}_2\text{O}_{8+d}$. *SN Applied Sciences*, 1, 96.
- Ghazanfari, N., Kılıç, A., Gencer, A. ve Özkan, H., 2007. Effects of Nb_2O_5 Addition on Superconducting Properties of BSCCO. *Solid State Communications*, 144, 210-214.
- Grivel, J.C. ve Flukiger, R., 1996. Factors Influencing the Apparent Activation Energy for the Formation of the $(\text{Bi,Pb})_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10+\delta}$ Compound. *Journal of Alloys and Compounds*, 241, 127-133.
- Gul, I.H., Rehman, M.A., Ali, M. ve Maqsood, A., 2005. Effect of Vanadium and Barium on the Bi-based (2223) Superconductors. *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 432, 71-80.
- Guner, S.B., Zalaoglu, Y., Turgay, T., Ozyurt, O., Ulgen, A.T., Dogruer, M. ve Yildirim, G., 2019. A Detailed Research for Determination of Bi/Ga Partial Substitution Effect in Bi-2212 Superconducting Matrix on Crucial Characteristic Features. *Journal of Alloys and Compounds*, 772, 388-398.
- Harabor, A., Rotaru, P. ve Harabor, N.A., 2019. Effect of Ni Substitute in Off-Stoichiometric Bi(Pb)-Sr-Ca-Cu(Ni)-O Superconductor. Excess Conductivity, XRD Analysis and Thermal Behaviour. *Ceramics International*, 45, 2742-2750.
- Ishii, A. ve Hatano, T., 2000. Preparation of High Quality $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_{8+\delta}$ Thin Films on a MgO Substrate by Pulsed Laser Ablation and Post-Annealing – Recrystallization of Films Accompanying In-Plane Rotation of *a* and *b* Axes. *Physica C*, 340, 173-177.
- Kishio, K., Komiya, S., Motohira, N., Kitazawa, K. ve Yamafuji, K., 1991. A Novel Method to Avoid Demagnetization Effect in Magnetization Studies of $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{CaCu}_2\text{O}_8$ Single Crystals with the Field Perpendicular to the CuO_2 Plane. *Physica C*, 185, 2377-2378.
- Maeda, H., Tanaka, Y., Fukutomi, M. ve Asano, T., 1988. A New High- T_c Oxide Superconductor without a Rare Earth Element. *Japanese Journal of Applied Physics*, 27(2), L209-L210.
- Mohd Suib, N.R., Abu Bakar, I.P., Ibrahim, N.B. ve Abd-Shukor, R., 2019. Critical Current Density and AC Susceptibility of $\text{Bi}_{1.6}\text{Pb}_{0.4}\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ Superconductor with $\text{Ni}_{0.5}\text{Zn}_{0.5}\text{Fe}_2\text{O}_4$ Nanomaterial. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, 32, 145-150.

- Padam, G.K., Arora, M., Kaushik, S.D. ve Ekbote, S.N., 2019. Enhanced Critical Current Density (J_c) and Fractural Strength of Low and High Eu Level Doped Bare Bulk (Bi, Pb)-2223 Rods for Cryogenic Applications. *Physica C: Superconductivity and its applications*, 562, 78-84.
- Rahal, H.T., Awad, R., Abdel-Gaber, A.M., Marhaba, S. ve Abou-Aly, A.I., 2019. A Comparative Study on the Influence of the Addition of Different Nano-Oxide Particles on the Thermopower of (Bi,Pb)-2223 Superconductor. *Applied Physics A*, 125, 365.
- Rouessac, V., Desgardin, G. ve Gomina, M., 1997. Influence of the Sinter-Forging Conditions on the Mechanical Properties of Textured Bulk (Bi,Pb)-2223 Ceramics. *Physica C*, 282-287, 2573-2574.
- Safran, S., Kılıç, A. ve Ozturk, O., 2017. Effect of Re-Pelletization on Structural, Mechanical and Superconducting Properties of BSCCO Superconductors. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 28, 1799-1803.
- Schneemeyer, L.F., Waszczak, J.V., Siegrist, T., van Dover, R.B. ve Rupp, L.W., 1987. Superconductivity in $YBa_2Cu_3O_7$ Single Crystals. *Nature*, 328, 601-603.
- Silver, T., Pan, A.V., Ionescu, M., Qin, M.J. ve Dou, S.X., 2002. Developments in High Temperature Superconductivity. *Annual Reports Section "C" (Physical Chemistry)*, 98, 323-373.
- Tran, D.H., Pham, A.T., Le, T.M., Anh, D.T.K., Phan, Y.T., Man, N.K., Pham, D. ve Kang, W.N., 2019. Enhanced Flux Pinning Properties in $Bi_{1.6}Pb_{0.4}Sr_{2-x}K_xCa_2Cu_3O_{10+\delta}$ Compounds. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 8233-8238.
- Ulgen, A.T., Turgay, T., Terzioglu, C., Yildirim, G. ve Oz, M., 2018. Role of Bi/Tm Substitution in Bi-2212 System on Crystal Structure Quality, Pair Wave Function and Polaronic States. *Journal of Alloys and Compounds*, 764, 755-766.
- Ulgen, A.T. ve Yildirim, G., 2019. Degradation in Fundamental Characteristic Features of Bi-2212 Superconducting Ceramic Material with Sr/Ti Partial Substitution. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 30, 8268-8277.
- Yamamoto, A., Takeshita, N., Terakura, C. ve Tokura, Y., 2015. High Pressure Effects Revisited for the Cuprate Superconductor Family with Highest Critical Temperature. *Nature Communications*, 6, 8990.
- Zouaoui, M., Ghattas, A., Annabi, M., Ben Azzouz, F. ve Ben Salem, M., 2008. Effect of Nano-Size ZrO_2 Addition on the Flux Pinning Properties of (Bi, Pb)-2223 Superconductor. *Superconductor Science and Technology*, 21, 125005.