

ΦΑΣΜΑΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ RAMAN ΤΟΥ ΥΠΕΡΑΓΩΓΟΥ MgB_2

Π. ΠΑΡΙΣΙΑΔΗΣ¹, Ε. ΛΙΑΡΟΚΑΠΗΣ¹, Ν. ΠΟΥΛΑΚΗΣ², Ε. ΦΛΟΥΔΑΣ², Μ. ΧΟΛΙΑΣΤΟΥ²

¹Τομέας Φυσικής, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 15780 Αθήνα

²Εθνικό Ινστιτούτο Μετρολογίας, 57022 Θεσσαλονίκη

email: parisiad@central.ntua.gr

Περίληψη

Μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την υλοποίηση του πρωτεύοντος προτύπου ηλεκτρικού ρεύματος είναι η παρασκευή διατάξεων σήραγγας ενός ηλεκτρονίου (single electron tunneling –SET) που βασίζονται σε υπεραγωγία υλικά. Η μελέτη των υλικών αυτών και η κατανόηση της νανοδομής τους είναι πρωταρχικής σημασίας για την επιτυχή χρήση τους ως πρότυπα ρεύματος.

Στην παρούσα εργασία μελετάται ο υπεραγωγός του διβοριδίου του μαγνησίου (MgB_2) με κρίσιμη θερμοκρασία $T_c=39K$, που είναι μέχρι σήμερα η ανώτερη παρατηρηθείσα τιμή για υπεραγωγό του οποίου οι ιδιότητες δεν οφείλονται στα επίπεδα των οξειδίων του χαλκού. Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις φασματοσκοπίας micro-Raman σε μονοκρυσταλλικά και πολυκρυσταλλικά δείγματα καθαρού MgB_2 , καθώς και σε δείγματα στα οποία το Mg ή το B έχει μερικώς αντικατασταθεί με Al, Li ή C αντίστοιχα, στη θερμοκρασιακή περιοχή 10-300K. Η συγκεκριμένη πειραματική μέθοδος έχει διακριτική ικανότητα μερικών μοναδιαίων κυψελίδων και αποτελεί ενδεδειγμένη τεχνική για τη μελέτη φάσεων νανοσκοπικής κλίμακας, ενώ παράλληλα δίνει τη δυνατότητα παρατήρησης των φωνονικών καταστάσεων που επηρεάζουν την υπεραγωγιμότητα.

Λέξεις - Κλειδιά: MgB_2 , υπεραγωγός, φασματοσκοπία Raman, πρότυπο ρεύματος

1. Εισαγωγή

Η ανακάλυψη της υπεραγωγιμότητας για το διβορίδιο του μαγνησίου στους 39K [1] έχει αποτελέσει αντικείμενο εκτενούς ενδιαφέροντος τόσο σε θεωρητικές όσο και σε πειραματικές μελέτες. Παρόλο που η δομή του είναι αρκετά απλούστερη από αυτή των περισσότερων υπεραγωγών υψηλών θερμοκρασιών, ο ακριβής προσδιορισμός των φωνονίων για το συγκεκριμένο σύστημα είναι ακόμα υπό αμφισβήτηση. Θεωρητικοί υπολογισμοί δείχνουν ότι μόνο ο E_{2g} συμμετρίας τρόπος ταλάντωσης, ο οποίος περιλαμβάνει τις ταλαντώσεις των ατόμων του βορίου στο ab -επίπεδο [2], αναμένεται να είναι ενεργός κατά Raman. Πειραματικές μελέτες που έγιναν με τη φασματοσκοπία Raman για το καθαρό MgB_2 αποδίδουν την πολύ ευρεία κορυφή στα $\sim 600\text{ cm}^{-1}$ που εμφανίζεται στα φάσματα στο συγκεκριμένο φωνόνιο [3-5], και η ισχυρή του σύζευξη με τις σ - ηλεκτρονικές καταστάσεις του βορίου πιστεύεται ότι είναι ο κύριος μηχανισμός που συνεισφέρει στην υπεραγωγιμότητα του συγκεκριμένου συστήματος.

2. Πειραματική διαδικασία

Για τη λήψη των φασμάτων χρησιμοποιήθηκε ένα τριπλό φασματόμετρο Jobin-Yvon T64000, εξοπλισμένο με κάμερα CCD υγρού αζώτου και μικροσκόπιο, το οποίο επέτρεπε τη μεγέθυνση μέχρι και 100 φορές. Χρησιμοποιήθηκε γεωμετρία οπισθοσκέδασης και οι γραμμές διέγερσης προέρχονταν από ένα υδρόψυκτο laser Ar^+

(σε μήκη κύματος 488.0 και 514.5 nm), καθώς και από ένα laser στερεάς κατάστασης στα 532.1 nm. Πάνω στο υλικό εστιαζόταν μια πολύ στενή δέσμη διαμέτρου 1-2μm σε πολύ χαμηλή ισχύ (20-50μW) ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα θερμικής διάχυσης γύρω από την περιοχή της ακτινοβολήσης. Επιπλέον πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις τόσο σε παράλληλες (xx) όσο και σε διασταυρωμένες (xy) πολώσεις με σκοπό την ταυτοποίηση των παρατηρούμενων κορυφών σε συγκεκριμένους τρόπους ταλάντωσης. Η μελέτη διαφορετικών σημείων πάνω στο δείγμα (και αντίστοιχα διαφορετικών κρυστάλλων στα πολυκρυσταλλικά δείγματα) δεν έδειξαν καμία τοπική ανομοιογένεια. Οι παρατηρούμενες κορυφές αναλύθηκαν μαθηματικά με την προσομείωση του φάσματος με τις ελάχιστες δυνατές Lorentzian καμπυλες ύστερα από την αφαίρεση γραμμικού υποβάθρου, με την ενέργεια και το εύρος των φωνονίων σταθερά στην περίπτωση προσομείωσης διαφορετικών πολώσεων για το ίδιο δείγμα.

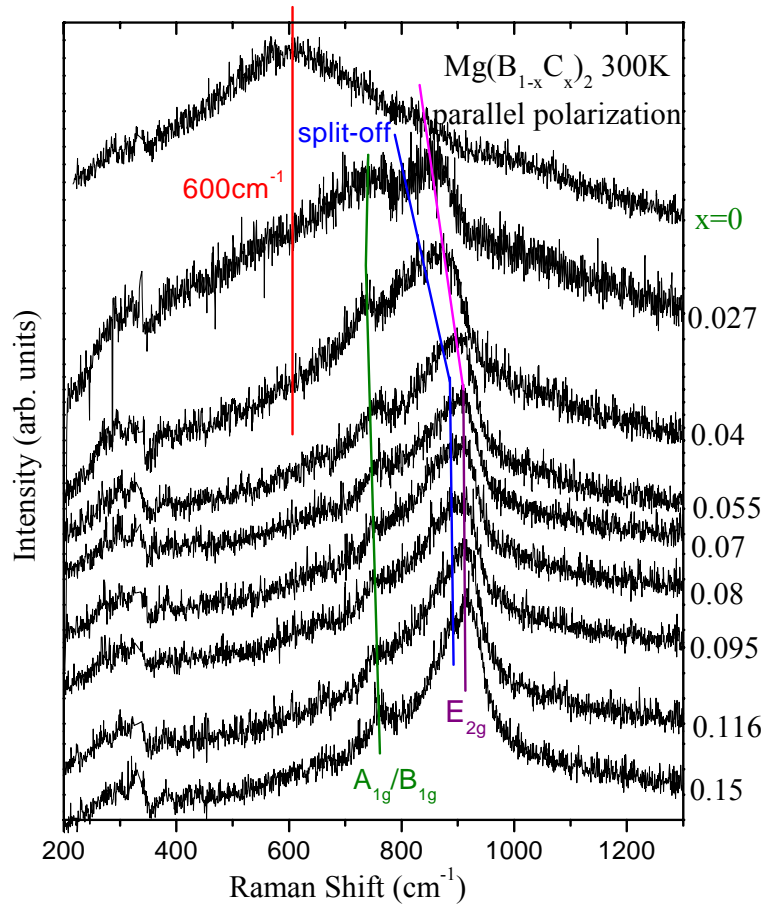
Για τις μετρήσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες χρησιμοποιήθηκε ένας κρυστάτης Oxford υγρού ηλίου σε συνδεσμολογία ανοιχτού κυκλώματος, ο οποίος επέτρεπε τη λήψη μετρήσεων σε μια θερμοκρασιακή περιοχή 10-300K, με θερμική αστάθεια μικρότερη του 1K. Τα φάσματα σε χαμηλές θερμοκρασίες διορθώθηκαν με το αντίστοιχο θερμικό παράγοντα Bose για την ονομαστική θερμοκρασία κάθε μέτρησης.

3. Μονοκρυσταλλικά δείγματα $Mg(B_{1-x}C_x)_2$

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας πραγματοποιήθηκε μια συστηματική φασματοσκοπική μελέτη micro-Raman σε μονοκρυσταλλικά δείγματα του υπεραγωγού $Mg(B_{1-x}C_x)_2$, για συγκεντρώσεις άνθρακα $x=0, 0.027, 0.04, 0.055, 0.07, 0.08, 0.095, 0.116$ και 0.15 σε θερμοκρασιακή περιοχή 10-300K. Στο σχήμα 1 παρουσιάζονται τα τυπικά φάσματα micro-Raman που ελήφθησαν σε θερμοκρασία δωματίου και παράλληλες πολώσεις, για διαφορετικές συγκεντρώσεις άνθρακα. Για το καθαρό MgB_2 ($x=0$), παρουσιάζεται μια πολύ ευρεία κορυφή (με FWHM ~ 300 cm^{-1}) σε ενέργεια ~ 600 cm^{-1} , κάτι το οποίο είναι σε πλήρη συμφωνία με την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

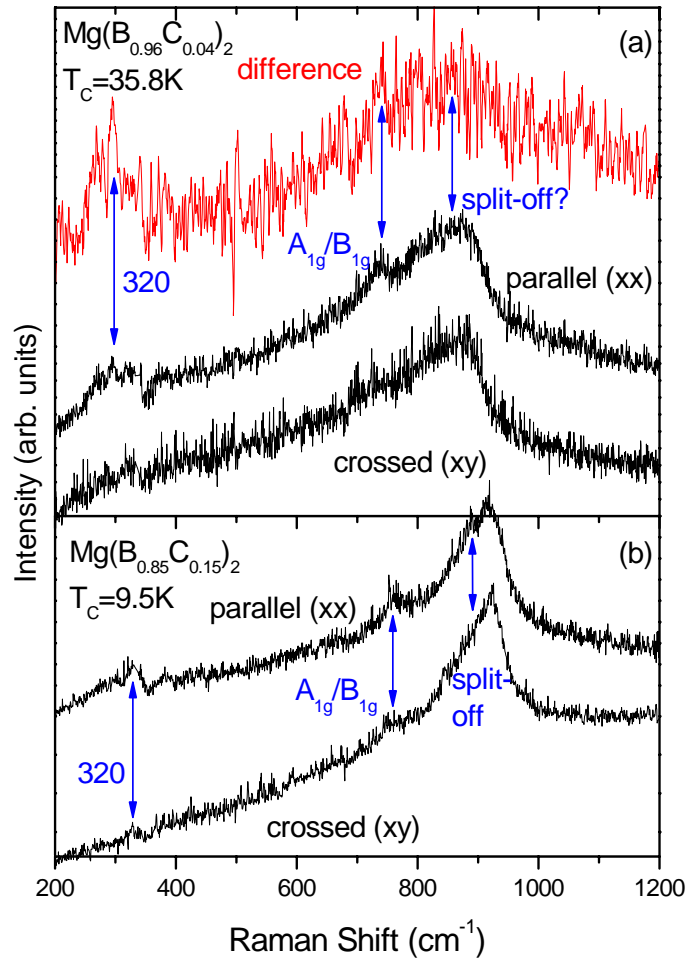
Τα φάσματα για όλα τα δείγματα στα οποία το βόριο έχει αντικατασταθεί μερικώς με άνθρακα παρουσιάζουν πολύ σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με το καθαρό MgB_2 . Η ένταση της ευρείας ζώνης στα ~ 600 cm^{-1} ελαττώνεται σημαντικά και ακόμη και για το δείγμα με μόλις 2.7% αντικατάσταση δεν έχει παρά ελάχιστη συνεισφορά στο φάσμα. Επιπλέον είναι φανερή η παρουσία δυο νέων ζωνών σε ενέργειες ~ 750 και ~ 850 cm^{-1} . Παρά τις σημαντικές μεταβολές στα φάσματα, η T_c μεταβάλλεται μόλις 1.2K για $x=0.027$. Για $x=0.08$ η κορυφή στα ~ 850 cm^{-1} φαίνεται να διασπάται σε δυο επιμέρους κορυφές (στα ~ 854 και 908 cm^{-1} για τη συγκεκριμένη συγκέντρωση). Η συγκεκριμένη κορυφή φαίνεται να είναι διπλή για όλες τις μετρηθείσες συγκεντρώσεις (η δεύτερη κορυφή θα καλείται στο εξής *split-off*), καθώς τα φάσματα δε μπορούν να προσομειωθούν ακριβώς χρησιμοποιώντας μονάχα μια Lorentzian στην περιοχή εκείνων των ενεργειών.

Μια ακόμα κορυφή παρουσιάζεται σε ενέργειες ~ 320 cm^{-1} , η οποία όμως αποκρύπτεται από τις γραμμές πλάσματος του laser στα 532.1 nm. Παρόλα αυτά είναι υπαρκτή, εφόσον εμφανίζεται και στις μετρήσεις σε άλλα μήκη κύματος (488 και 514.5 nm) τα οποία δεν έχουν παρασιτικές γραμμές σε εκείνη την περιοχή ενεργειών. Τέλος, μια αδύναμη ενεργειακή ζώνη στα ~ 1050 cm^{-1} , μεγάλου εύρους (~ 200 cm^{-1}), κάνει την εμφάνισή της σε όλα τα φάσματα.



Σχήμα 1. Τυπικά φάσματα micro-Raman της ένωσης $Mg(B_{1-x}C_x)_2$ για διάφορες συγκεντρώσεις άνθρακα ($x=0$ έως $x=0.15$). Παρατηρούνται κορυφές σε ενέργειες ~ 600 , ~ 750 , ~ 850 (διπλή), και ~ 1050 cm^{-1} .

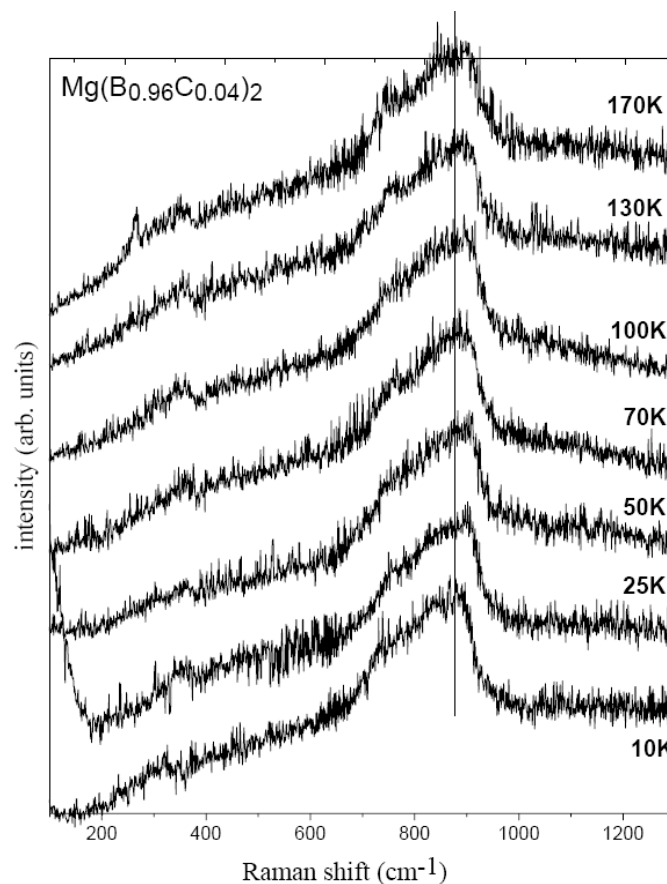
Καθώς η προέλευση των κορυφών στα ~ 750 και ~ 850 cm^{-1} δεν είναι γνωστή (σε αντίθεση με την κορυφή στα ~ 600 cm^{-1} στην οποία έχει αποδοθεί E_{2g} συμμετρία), εφαρμόστηκαν οι κατάλληλοι κανόνες επιλογής στα φάσματα Raman, σε μια προσπάθεια ταυτοποίησης των κορυφών αυτών. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο σχήμα 2 για $x=0.04$ και $x=0.15$.) το E_{1g} . Η κορυφή στα ~ 750 cm^{-1} εμφανίζεται στις παράλληλες πολώσεις (xx) και εμφανίζεται με πολύ μειωμένη σχετική ένταση στις διασταυρωμένες (xy), οπότε αναλογεί σε A_{1g}/B_{1g} συμμετρία. Η θεωρητική ανάλυση των κανονικών τρόπων ταλάντωσης με κυματόνισμα $\mathbf{k}=0$ (δηλαδή φωνόνια διεγερόμενα από το κέντρο της ζώνης Brillouin) προβλέπει μόνο έναν ενεργό κατά Raman τρόπο ταλάντωσης, συμμετρίας E_{2g} (το B_{1g} φωνόνιο που αναμένεται δεν είναι παρατηρήσιμο κατά Raman). Το γεγονός ότι η συγκεκριμένη κορυφή δείχνει να παρουσιάζει A_{1g}/B_{1g} συμμετρία, ίσως σημαίνει την παραβίαση των κανόνων επιλογής, λόγω της αταξίας και της ανομοιογένειας που προκαλεί στο υλικό η αντικατάσταση του βορίου με άνθρακα. Την ίδια συμμετρία παρουσιάζει και η χαμηλότερης ενέργειας κορυφή (*split-off*) από τις δυο που φαίνονται κοντά στα ~ 850 cm^{-1} (σχήμα 2b). Ο συγκεκριμένος τρόπος ταλάντωσης θα μπορούσε να αντιστοιχεί στην ενεργοποίηση του B_{1g} φωνονίου λόγω της αντικατάστασης, ή εναλλακτικά στην εμφάνιση στο φάσμα ενός φωνονίου συμμετρίας A_{1g} από τα άκρα της ζώνης Brillouin. Αντιθέτως, η κορυφή υψηλότερης ενέργειας στα ~ 850 cm^{-1} διατηρείται με αμείωτη ένταση και στις παράλληλες και στις διασταυρωμένες πολώσεις, οπότε αντιστοιχεί σε E_{2g} συμμετρία, ίδια με της κορυφής στα ~ 600 cm^{-1} .



Σχήμα 2. Εφαρμογή των κανόνων επιλογής για δύο επιλεγμένα δείγματα ($x=0.04$ και $x=0.15$). Με κόκκινο χρώμα είναι η διαφορά μεταξύ των φασμάτων xx και xy για $x=0.04$, όπου φαίνονται καθαρά οι κορυφές A_{1g}/B_{1g} συμμετρίας (~ 320 , ~ 750 και πιθανότατα η *split-off*). Για $x=0.15$ η μείωση της έντασης της *split-off* κορυφής στις διασταυρωμένες (xy) πολώσεις είναι ακόμα περισσότερο προφανής.

Για την περαιτέρω μελέτη του υλικού πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις micro-Raman σε χαμηλές θερμοκρασίες (μέχρι και 10K). Οι μετρήσεις έγιναν σε γεωμετρία οπισθοσκέδασης και για παράλληλες πολώσεις, για επιλεγμένα δείγματα. Αρχικά απεικονίζονται τα φάσματα σε θερμοκρασίες 10, 25, 50, 70, 100, 130 και 170 K, για το δείγμα $Mg(B_{1.96}C_{0.04})_2$ με $x=0.04$ (σχήμα 3). Όπως είναι φανερό δεν παρατηρούνται νέες κορυφές στα φάσματα micro-Raman για χαμηλές θερμοκρασίες, και εμφανίζονται οι ίδιες κορυφές που παρατηρούνται σε θερμοκρασία δωματίου στα ~ 600 , ~ 750 και ~ 850 cm^{-1} . Επιπλέον, η κορυφή στα ~ 320 cm^{-1} είναι αληθινή, μιας και τα συγκεκριμένα φάσματα ελήφθησαν με μια γραμμή laser στα 488.0 nm, όπου δεν αναμένονται γραμμές πλάσματος σε αυτή την ενέργεια. Το MgB_2 δεν υπόκειται σε κάποια δομική αλλαγή φάσης με τη θερμοκρασία, οπότε δεν παρατηρούνται νέα χαρακτηριστικά στα φάσματα, που θα αντιστοιχούσαν για παράδειγμα, σε νέους τρόπους ταλάντωσης λόγω της υποτιθέμενης διαφορετικής δομής. Ανώμαλες μεταβολές κοντά στην T_C (39K) δεν παρατηρούνται για την ενέργεια και το εύρος. Στα φάσματα του σχήματος η κορυφή στα ~ 600 cm^{-1} , η οποία έχει αποδοθεί στο E_{2g} φωνόνιο, έχει ελάχιστη συνεισφορά στο μετρούμενο σήμα και μπορεί να παρασταθεί μόνο ως μια “ουρά” πολύ μικρής έντασης. Έτσι δεν είναι εύκολο να βγουν ασφαλή

συμπεράσματα για τη συμπεριφορά του συγκεκριμένου φωνονίου σε χαμηλές θερμοκρασίες από αυτές τις μετρήσεις. Οι Martinho et al [6], μελετώντας τη συμπεριφορά του E_{2g} τρόπου ταλάντωσης στο καθαρό MgB_2 για χαμηλές θερμοκρασίες παρατήρησαν μια μικρή αύξηση του εύρους με τη θερμοκρασία, συνεπή με συμπεριφορά δύο καταστάσεων (two-mode behavior), ενώ η ενέργεια του φωνονίου παρέμεινε αμετάβλητη. Κάτω από την κρίσιμη θερμοκρασία T_C δεν παρατηρήθηκαν μεταβολές στα φάσματα, γεγονός που οδήγησε τη συγκεκριμένη ερευνητική ομάδα στο συμπέρασμα ότι και άλλοι τρόποι ταλάντωσης των ατόμων του βορίου, πέρα από το κέντρο της ζώνης Brillouin, πιθανόν να παίζουν ρόλο στην υπεραγωγιμότητα του συστήματος. Τα παραπάνω, σε συνδυασμό με την υπόθεση για μια ηλεκτρονική τοπολογική μετάβαση Lifshitz του συστήματος, είναι αρκετά συνεπή με τα αποτελέσματα.

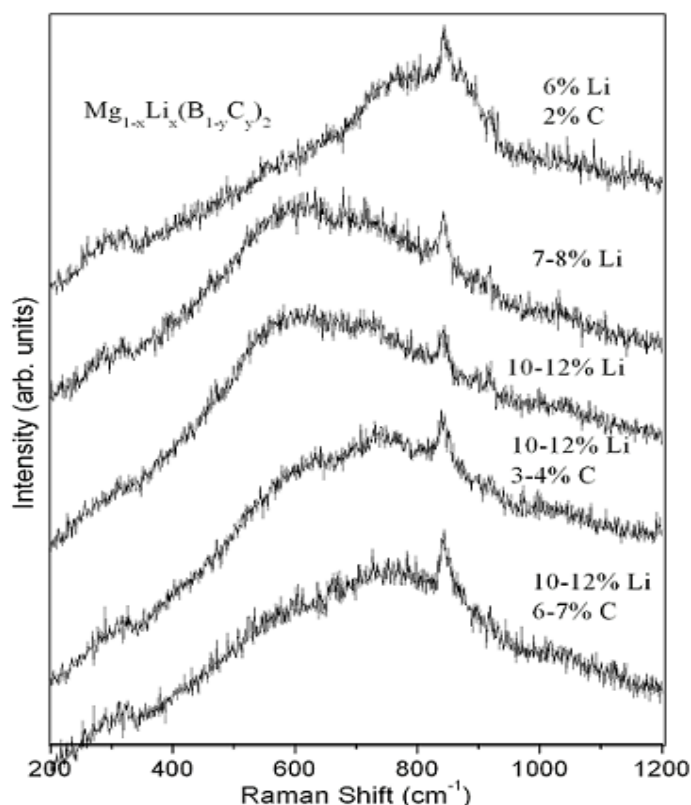


Σχήμα 3. Μετρήσεις σε χαμηλές θερμοκρασίες, από 10-170K για $x=0.04$.

4. Μονοκρυσταλλικά δείγματα $Mg_{1-x}Li_x(B_{1-y}C_y)_2$

Η προσθήκη λιθίου (μέχρι 8%) δε μεταβάλλει σημαντικά την κρίσιμη θερμοκρασία υπεραγωγικής μετάβασης, σε σχέση με την προσθήκη άνθρακα, φαίνεται όμως ότι συνδυασμένες οι δυο αντικαταστάσεις ρίχνουν ακόμη περισσότερο την T_C απ' ότι ο άνθρακας μόνος του. Η προσθήκη άνθρακα στο πλέγμα εισάγει ηλεκτρόνια, ενώ όταν το μαγνήσιο αντικαθίσταται από το λίθιο αυξάνεται το πλήθος των οπών. Η μείωση στην κρίσιμη θερμοκρασία για τους μονοκρυστάλλους διπλής αντικατάστασης προκύπτει από τη συνολική μείωση που προκαλεί κάθε πρόσμιξη ξεχωριστά. Το φαινόμενο μπορεί να ερμηνευθεί με την υπόθεση ότι η αναμενόμενη αύξηση στην T_C λόγω της εισαγωγής οπών (στην περίπτωση του λιθίου)

αντισταθμίζεται από την αυξημένη επίδραση της διαζωνικής σκέδασης (interband scattering) ή από το γεγονός ότι οι επιπλέον οπές δε συμμετέχουν στη συμπλήρωση των σ - τροχιακών.



Σχήμα 4. Φάσματα micro-Raman για δείγματα MgB_2 με αντικατάσταση του μαγνησίου από λίθιο ή/και αντικατάσταση του βορίου από άνθρακα.

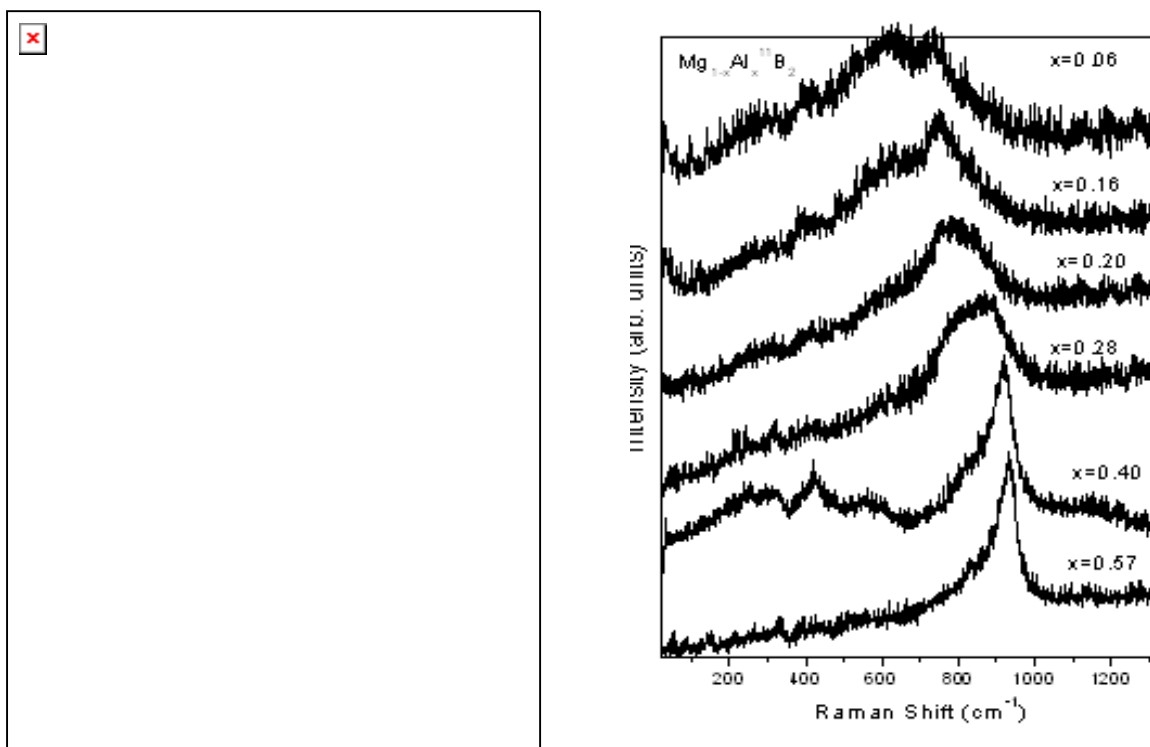
Τα ληφθέντα φάσματα Raman παρουσιάζονται στο σχήμα 4. Παρατηρείται όπως και στην περίπτωση του άνθρακα η εμφάνιση νέων κορυφών για τα δείγματα με αντικατάσταση σε ενέργειες ~ 750 και $\sim 850 \text{ cm}^{-1}$. Η υψηλή ενέργεια τους υποδεικνύει ότι αντιστοιχούν σε ταλαντώσεις των ατόμων του βορίου. Το εύρος για την κορυφή στα $\sim 750 \text{ cm}^{-1}$ είναι στα ίδια επίπεδα με το εύρος της αντίστοιχης κορυφής στην προσθήκη άνθρακα, ενώ η κορυφή υψηλότερης ενέργειας παρουσιάζεται αρκετά στενότερη. Όσον αφορά την ευρεία ζώνη στα $\sim 600 \text{ cm}^{-1}$, που αντιστοιχεί στο E_{2g} που αλληλεπιδρά με τις σ -ζώνες του βορίου, φαίνεται να ελαττώνεται σε ένταση για αύξουσα συγκέντρωση άνθρακα. Αντιθέτως, η σχετική ένταση του συγκεκριμένου τρόπου ταλάντωσης ενισχύεται για τα δείγματα στα οποία υπάρχει λίθιο. Φαίνεται λοιπόν ότι η εισαγωγή οπών (λίθιο) αντισταθμίζει τα φαινόμενα που δημιουργεί η προσθήκη ηλεκτρονίων (άνθρακας). Μέχρι 6% λίθιο πάραυτα, οι νέες κορυφές υψηλότερης ενέργειας φαίνεται να παίζουν καθοριστικό ρόλο, όμως για μεγαλύτερες συγκεντρώσεις η ευρεία ζώνη αποτελεί το κυρίαρχο φασματικό χαρακτηριστικό. Τέλος, όπως και στα φάσματα με απλή αντικατάσταση άνθρακα, εμφανίζονται ασθενείς κορυφές σε ενέργειες ~ 320 και $\sim 1050 \text{ cm}^{-1}$.

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων μπορεί να έχει ποικίλες διαστάσεις. Καταρχάς η μείωση της T_c με την προσθήκη οπών (λίθιο) για έναν υπεραγωγό όπως το MgB_2 (του οποίου οι φορείς υπεραγωγιμότητας είναι οπές), υποδηλώνει ότι η αύξηση της T_c που θα έπρεπε να λαμβάνει χώρα υποσκελίζεται από τη μείωση της

λόγω διαζωνικής σκέδασης. Σύμφωνα με τους Bernardini και Massida [7], η πρόσμιξη λιθίου δεν επηρεάζει τη συμπλήρωση των σ -ζωνών, αλλά αντιθέτως τα άτομα του λιθίου που εισάγονται στο πλέγμα δέχονται ηλεκτρόνια από τις π -ζώνες. Είναι δε πιθανό τα άτομα του λιθίου να οδηγούν στην παραμόρφωση της εσωτερικής δομής του υλικού, με αποτέλεσμα την αύξηση της διαζωνικής σκέδασης. Η συνολική επιρροή της διπλής αντικατάστασης στην T_c του MgB_2 μπορεί να γίνει κατανοητή ως αποτέλεσμα αμφότερων της ανακατανομής των ηλεκτρονικών φορέων και της σκέδασης από τα άτομα προσμίξεων.

5. Πολυκρυσταλλικά δείγματα $Mg_{1-x}Al_xB_2$

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων Raman σε πολυκρυσταλλικά δείγματα $Mg_{1-x}Al_x^{10,11}B_2$ παρουσιάζονται στο σχήμα 5. Είναι προφανής η σημαντική μείωση της σχετικής έντασης της ευρείας ζώνης στα 600 cm^{-1} με την προσθήκη αλουμινίου σε σχέση με το καθαρό MgB_2 . Η μείωση δε του εύρους αμφότερων των E_{2g} -συμμετρίας κορυφών με την περιεκτικότητα αλουμινίου είναι μια ένδειξη της μείωσης της σύζευξης ηλεκτρονίου-φωνονίου, η ισχύ της οποίας είναι προφανώς ένα μέτρο για την υπεραγωγιμότητα του υλικού.



Σχήμα 5. Φάσματα micro-Raman για δείγματα MgB_2 με αντικατάσταση του μαγνησίου από αλουμίνιο.

Η συγκεκριμένη κορυφή φαίνεται να μην έχει καμία συνεισφορά στο φάσμα για $x > 0.3$. Επιπλέον, δυο νέες κορυφές εμφανίζονται στο φάσμα σε ενέργειες ~ 750 και $\sim 850\text{ cm}^{-1}$, παραπλήσιες με αυτές στην περίπτωση της αντικατάστασης με άνθρακα, λίθιο και άνθρακα-λίθιο. Η ζώνη στα $\sim 750\text{ cm}^{-1}$ κυριαρχεί στο φάσμα για ενδιάμεσες συγκεντρώσεις ενώ η ζώνη στα $\sim 850\text{ cm}^{-1}$ αποτελεί το βασικό παράγοντα της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας για τα υψηλότερα επίπεδα αντικατάστασης αλουμινίου. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα δυο τελευταία δείγματα που μετρήθηκαν ($x=0.50$, $x=0.57$) δε βρίσκονται στην υπεραγώγιμη φάση. Επιπλέον η κορυφή που

φαίνεται και στις προηγούμενες αντικαταστάσεις σε ενέργεια $\sim 320 \text{ cm}^{-1}$ είναι παρούσα και στην περίπτωση του αλουμινίου, ενώ τέλος η ζώνη στα $\sim 420 \text{ cm}^{-1}$ που εμφανίζεται έχει παρατηρηθεί ξανά σε προηγούμενα φάσματα και η προέλευσή της έχει αποδοθεί στην πυκνότητα φωνονικών καταστάσεων (PDOS), σύμφωνα με πειράματα σκέδασης νετρονίων [8].

Επιπλέον, από τη μελέτη των διαφορετικών ισοτόπων υπολογίστηκε η % μεταβολή στην ενέργεια κάθε παρατηρούμενου τρόπου ταλάντωσης. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι δυο κορυφές υψηλότερης ενέργειας (~ 750 και $\sim 850 \text{ cm}^{-1}$) συμπεριφέρονται σαν κανονικά φωνόνια, με την ενέργειά τους να μεταβάλλεται για κάθε ένα από τα ισότοπα (ίδια συγκέντρωση αλουμινίου αλλά διαφορετική μάζα βορίου) σύμφωνα με τη μεταβολή της μάζας. Για την αντικατάσταση του ^{11}B με ^{10}B αναμένεται μια μεταβολή $\sim 4.8\%$ στην ενέργεια του φωνονίου, αν αυτό αντιστοιχεί σε ταλαντώσεις βορίου και για την πληθώρα των μελετημένων δειγμάτων τα αποτελέσματα της ισοτοπικής αντικατάστασης βρίσκονται πολύ κοντά σε αυτή την τιμή. Αντιθέτως, η κορυφή στα $\sim 600 \text{ cm}^{-1}$ έχει μια τελείως διαφορετική συμπεριφορά στην ισοτοπική αντικατάσταση: οι μεταβολές είναι πολύ μικρότερες από την αναμενόμενη τιμή και για κάποια δείγματα δεν υπάρχει καμία διαφορά στην ενέργεια του φωνονίου. Τα αποτελέσματα αυτά οδηγούν στην υποψία ότι η συγκεκριμένη κορυφή στο MgB_2 μπορεί να μη συσχετίζεται άμεσα με τις ταλαντώσεις του βορίου. Εναλλακτικά, δεδομένου του πολύ μεγάλου της εύρους ($\sim 300 \text{ cm}^{-1}$ για το καθαρό MgB_2), η συγκεκριμένη κορυφή θα μπορούσε να αντιστοιχεί στη φωνονική πυκνότητα καταστάσεων (PDOS).

6. Συμπεράσματα

Η παρούσα έρευνα παρουσιάζει μια εκτενή φασματοσκοπική μελέτη Raman του υπεραγωγού MgB_2 , με διάφορες ατομικές αντικαταστάσεις, σε θερμοκρασιακό εύρος 10-300K και για παράλληλες και διασταυρωμένες πολώσεις του προσπίπτοντος και του σκεδαζόμενου φωτός. Σε όλες τις περιπτώσεις η ευρεία ζώνη E_{2g} συμμετρίας στα $\sim 600 \text{ cm}^{-1}$ για το καθαρό MgB_2 ελαχιστοποιείται με την αντικατάσταση και το κύριο φασματικό βάρος αντιστοιχεί σε ζώνες ενεργειών ~ 750 και $\sim 850 \text{ cm}^{-1}$, που φαίνεται να αντιστοιχούν σε συμμετρίες A_{1g}/B_{1g} και E_{2g} αντίστοιχα. Η μελέτη της ισοτοπικής αντικατάστασης του βορίου δείχνει ότι οι δυο τελευταίες κορυφές συμπεριφέρονται σαν τυπικά φωνόνια, σε αντίθεση με την ευρεία E_{2g} ζώνη, η οποία παρουσιάζει μια περισσότερο αναρμονική συμπεριφορά.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani and J. Akimitsu, Nature 410, 63 (2001).
- [2] K. Kunc, I. Loa, K. Syassen, R. K. Kremer and K. Ahn, J. Phys.: Condens. Matter 13, 9945 (2001).
- [3] K.-P. Bohnen, R. Heid and B. Renker, Phys. Rev. Lett. 86, 5771 (2001).
- [4] A. F. Goncharov, V. V. Struzhkin, E. Gregoryanz, J. Hu, R. J. Hemley, H.-K. Mao, G. Lapertot, S. L. Bud'ko and P. C. Canfield, Phys. Rev. B 64, 100509 (2001).
- [5] J. Hlinka, I. Gregora, J. Pokorny, A. Plecenik, P. Kus, L. Satrapisky and S. Benaka, Phys. Rev. B 64, 140503 (2001).
- [6] H. Martinho, C. Rettori, P.G. Pagliuso, A. A. Martin, N. O. Moreno and J. L. Sarrao, Solid State Commun. 125, 499 (2003).
- [7] F. Bernardini et. S. Massidda, Phys. Rev. B 74, 014513 (2006).

[8] R. Osborn, E. A. Goremychkin, A. I. Kolesnikov, D. G. Hinks, Phys. Rev. Lett. 87 (2001) 037001.

Η εργασία πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της συνεργασίας Ελληνικού Ινστιτούτου Μετρολογίας, Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και Τεχνολογικού Εκπαιδευτικού Ιδρύματος Κοζάνης, πρόγραμμα ΠΕΝΕΔ 03ΕΔ (Επαν, Μέτρο 8.3.-Δράση 8.3.1)