

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ МОНОКРИСТАЛЛОВ C_{60}

Ю.А.Осипьян*, Ю.И.Головин, Д.В.Лопатин, Р.Б.Моргунов, Р.К.Николаев*,
С.З.Шмурак*

Тамбовский государственный университет им.Г.Р.Державина
392622 Тамбов, Россия

*Институт физики твердого тела РАН
142432 Черноголовка, Московская обл., Россия

Поступила в редакцию 4 декабря 1998 г.

Обнаружено влияние импульсов магнитного поля с индукцией более 10 Тл на микротвердость монокристаллов C_{60} . Установлено, что магнитное поле обратимо изменяет объемные свойства материала.

PACS: 61.72.Nh

Исследования изменений механических свойств реальных кристаллов под действием внешних магнитных полей (МП) способны дать важную информацию о физических процессах в подсистеме структурных дефектов, недоступную другим методам [1–3]. В последнее время надежно установлено, что даже энергетически слабые МП с индукцией $\sim 1 - 10$ Тл могут вызывать в диамагнитных диэлектрических кристаллах и полимерах долговременные остаточные изменения их пластических свойств [1]. В [4, 5] показано, что это может объясняться влиянием МП на кинетику и выход спин-зависимых реакций в подсистеме парамагнитных структурных дефектов, которые влияют на подвижность дислокаций. В [6] методом модифицированного ЭПР получены прямые экспериментальные подтверждения этой гипотезы. Представляется важным исследование влияния МП на механические свойства новых материалов, таких как фуллериты. В первых же исследованиях пластических свойств фуллеритов [7–9] установлено, что их пластичность определяется дислокационными механизмами, а структурные дефекты обладают парамагнитными свойствами [10–12]. Это позволяет предполагать, что магнитопластические эффекты, обнаруженные в ионных и ковалентных кристаллах, могут иметь место и в фуллеритах.

В настоящей работе исследовалась возможность проявления остаточных изменений микротвердости фуллеритов после их предварительной экспозиции в МП. Для исследования чувствительности микротвердости к МП использовали монокристаллические образцы C_{60} высокой чистоты (99.95% C_{60}), выращенные из паровой фазы и имеющие естественную для кубических гранцентрированных кристаллов огранку и средний линейный размер $\sim 3 - 5$ мм. Кристаллы закрепляли на стекле с помощью плицина так, чтобы исследуемая грань была доступна для индентирования и параллельна столику микротвердомера ПМТ-3. Индентирование производили в течение 5 с при нагрузке на индентор 20 г. Известно, что микротвердость C_{60} изменяется по мере старения образцов на воздухе в результате фотостимулированного окисления поверхности [9, 13], поэтому, чтобы замедлить окисление, все экспериментальные процедуры осуществляли в темноте, кроме измерений размеров отпечатков, которые выполняли при слабом красном свете. Это позволяло в отсутствие МП в течение

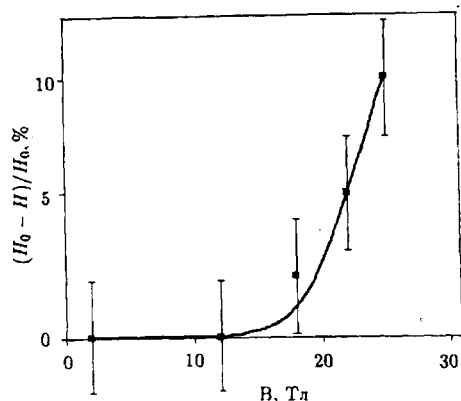


Рис.1. Зависимость относительного различия $(H_0 - H)/H_0$ в микротвердости кристаллов S_{60} , не подвергавшихся экспозиции в магнитном поле H_0 и подвергавшихся его действию H , от амплитуды импульса поля V

~ 10 суток сохранять постоянным значение микротвердости кристаллов таким же, как сразу после их извлечения из вакуумированной капсулы. Каждая точка на графиках (рис.1 и рис.2) получена усреднением размеров 15 – 20 отпечатков, созданных при одних и тех же условиях. Импульсы МП имели форму, близкую к форме одного полупериода синусоиды амплитудой V до 24 Тл и длительностью 140 мкс, и генерировались в маловитковом соленоиде при разряде батареи конденсаторов.

В опытах исследовали влияние предварительной обработки кристаллов в импульсном МП на их микротвердость H . Значение микротвердости H_0 в образцах, не подвергавшихся экспозиции в МП (то есть в контрольных опытах), составляло 210 ± 4 МПа, что близко к данным, полученным в [8] для кристаллов "as grown". В кристаллах, подвергнутых однократному действию импульса МП, микротвердость H , измеренная через 1 мин после обработки в поле, была меньше, чем в контрольных опытах на $(H_0 - H)/H_0 = 10 \pm 2\%$ (рис.1). После импульса МП кристалл подвергали шлифовке для снятия слоя материала толщиной 100 – 300 мкм, а затем измеряли микротвердость на свежесформированной поверхности. Ее значение отличалось от H_0 на такую же величину, как и микротвердость H , измеренная на исходной поверхности. Следовательно, действию МП были подвержены не только приповерхностные, но и объемные слои материала. Изменение микротвердости после экспозиции кристаллов в МП было надежно регистрируемым только при $V > 10$ Тл и не наблюдалось при меньших V (рис.1).

Если в течение нескольких часов после первой обработки кристалла в МП образец продолжали подвергать многократному индентированию, можно было обнаружить, что с увеличением паузы между импульсом МП и измерением микротвердости значение H увеличивалось и через ~ 6 ч достигало уровня H_0 , то есть величина эффекта разупрочнения $(H_0 - H)/H_0$ становилась равной нулю (рис.2).

Включение второго импульса МП сразу после восстановления H до H_0 не приводило к изменению микротвердости кристалла, однако третий и четвертый импульсы поля, приложенные соответственно через 8 и 120 ч после первого, вновь приводили к понижению микротвердости, несколько меньшему, чем от первого импульса МП (рис.2). Таким образом, имеется интервал времени, в котором отсутствует чувствительность кристалла к повторным импульсам МП.

В отдельной серии опытов установлено, что экспозиция кристаллов в течение 20 с и 2 мин в постоянном МП с индукцией $B = 2$ Тл не приводит к изменению H в пределах погрешности экспериментов. Кроме того, было проверено, что электрическое поле токоподводов к соленоиду не влияет на микротвердость кристаллов.

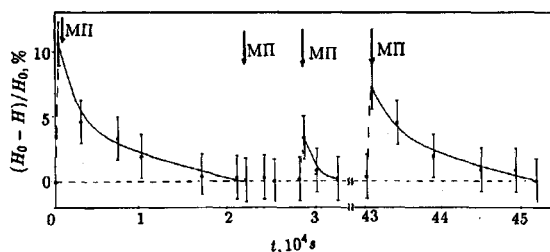


Рис.2. Зависимость относительного различия $(H_0 - H)/H_0$ в микротвердости кристаллов C_{60} , не подвергавшихся экспозиции в магнитном поле H_0 и подвергавшихся его действию H , от длительности паузы t между первым импульсом МП и последующими измерениями микротвердости H . Стрелкой показаны моменты включения дополнительных импульсов МП. Амплитуда всех импульсов МП $B = 24$ Тл

Из результатов описанных опытов вытекает, что импульс МП вызывает в кристаллах обратимое понижение микротвердости, однако эти данные не позволяют судить о степени обратимости тех изменений, которые вызывает МП в подсистеме структурных дефектов на микроуровне, поскольку, как установлено в [1], обратимость макропластических свойств не всегда свидетельствует об обратимости внутренних перестроек. Это связано с тем, что в процессе релаксации структурные дефекты могут проходить через ряд состояний со все более и более низким термодинамическим потенциалом [1], а в зависимости от конфигурации дефектов в каждом из этих состояний подвижность дислокаций и пластичность может быть как ниже, так и выше исходного значения [1].

Простые оценки показывают, что пондеромоторные силы, возникающие в МП в диамагнитных кристаллах (в том числе и в C_{60}), на много порядков меньше, чем силы, необходимые для надежно регистрируемого изменения пластических свойств. Попытка связать влияние МП на микротвердость с изменением электронного состояния стабильных дефектов наталкивается на следующее противоречие. Изменения микротвердости, индуцируемые МП, остаются в течение длительного времени после его отключения, в то время как энергия, сообщаемая полем спиновому моменту электрона, составляет всего 20% от средней тепловой энергии kT при температуре опытов $T \sim 300$ К. При таком соотношении между магнитной и тепловой энергиями МП не может возбуждать равновесные дефекты и электронную подсистему кристалла в целом.

Вероятно, объектами, подверженными действию МП в C_{60} , как и в ионных кристаллах [1–3], являются неравновесные точечные дефекты, а также дислокации (концентрация последних в исследуемых кристаллах составляла $\sim 10^6$ см²). В фуллеритах, используемых в наших экспериментах, сосуществуют простая кубическая и ГЦК фазы, причем простая кубическая модификация метастабильна. Можно предполагать, что подобно соединениям $A^{IV}B^{VI}$ энергетически выгодное при комнатной температуре превращение кубической фазы в ГЦК сопровождается перемещением

двойниковых дислокаций. Поэтому причиной изменения H может быть стимулированное полем движение дислокаций.

Кроме того, причины изменения H под действием МП в молекулярных кристаллах могут быть близки к тем, которые объясняют пластификацию полимеров в МП. Известно, например, что связи типа С – О обладают значительной анизотропией магнитной восприимчивости, которая приводит к переориентации макромолекул в полимерах в МП [14, 15]. Наличие подобных связей у молекул C_{60} может объяснять изменение H переориентацией в МП отдельных молекул.

Таким образом, в кристаллах C_{60} обнаружен магнитоэластический эффект, который заключается в изменении их микротвердости после воздействия импульса МП. Установление природы этого явления требует дальнейших исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 97-02-16074).

-
1. Yu.I.Golovin and R.V.Morgunov, Chem. Rev. **24**, 1 (1998).
 2. А.А.Урусовская, В.И.Альшиц, А.Е.Смирнов, Н.Н.Беккауер, Письма в ЖЭТФ **65**, 471 (1997).
 3. Э.П.Белозерова, А.А.Светашев, В.Л.Красников, Изв. АН, сер. физ. **61**, 291 (1997).
 4. M.I.Molotskii, R.E.Kris, and V.N.Fleurov, Phys. Rev. **B51**, 12531 (1995).
 5. В.И.Альшиц, Е.В.Даринская, О.Л.Казаква, ЖЭТФ **111**, 615 (1997).
 6. Ю.И.Головин, Р.Б.Моргунов, В.Е.Иванов, С.Е.Жуликов, Письма в ЖЭТФ **68**, 400 (1998).
 7. Yu.A.Ossipian, V.S.Bobrov, Yu.S.Grushko et al., Appl. Phys. **A56**, 1 (1993).
 8. V.S.Bobrov, R.A.Dilanian, L.S.Fomenko et al., J. of Supercond. **8**, 1 (1995).
 9. В.И.Орлов, В.И.Никитенко, Р.К.Николаев и др., Письма в ЖЭТФ **59**, 667 (1994).
 10. S.K.Misra and V.Petkov, Appl. Magn. Resonance **8**, 277 (1995).
 11. J.Stankovski, W.Kempinski, A.Koper, and J.Martinek, Appl. Magn. Resonance **6**, 145 (1994).
 12. Y.Ksari and G.Chouteau, Fullerene Science and Techn. **4**, 1227 (1996).
 13. I.Manika and J.Maniks, Fullerene Science and Techn. **5**, 149 (1997).
 14. Г.Маре, К.Дрансфельд, *Сильные и сверхсильные магнитные поля и их применения*, М.: Мир, 1988.
 15. G.K.Deshpande and M.L.Khare, Indian J. Pure and Appl. Phys. **17**, 143 (1979).