

Магнитный изотопный эффект в пластичности диамагнитных кристаллов

А. Л. Бучаченко¹⁾

Институт химической физики РАН, 119991 Москва, Россия

Поступила в редакцию 5 сентября 2006 г.

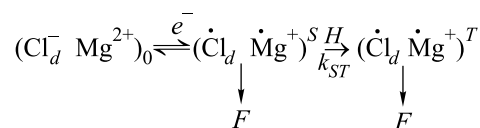
Предсказан магнитный изотопный эффект в пластичности диамагнитных кристаллов, смысл которого состоит в том, что замещение немагнитных изотопных ядер магнитными ядрами в ионных кристаллах (например, введение $^{25}\text{Mg}^{2+}$ или $^{43}\text{Ca}^{2+}$ вместо $^{24}\text{Mg}^{2+}$ или $^{40}\text{Ca}^{2+}$ в NaCl) увеличивает пластичность кристаллов даже в отсутствие внешнего магнитного поля. Напротив, в ковалентных кристаллах такое замещение (например, введение ^{29}Si в кремний и ^{13}C в алмаз) должно снижать пластичность и создавать дислокационное упрочнение.

PACS: 61.72.Nb

Известно, что пластичность и другие родственные механические свойства диамагнитных кристаллов (NaCl, PbS, LiF, Si и др.) зависят от магнитного поля. Это замечательное явление названо магнитопластичностью [1–7]. Смысл его состоит в том, что в магнитном поле увеличивается доля свободных дислокаций и возрастает их пробег. В этой статье мы покажем, что такого же увеличения пластичности диамагнитных ионных кристаллов можно достичь без внешнего магнитного поля.

Напомним, что в физике магнитопластичности главным элементом является образование спинового нанореактора при переносе электрона от захваченной стопором дислокации к стопору [8, 9]. При этом выключается кулоновское взаимодействие между стопором и плененной дислокацией. В спиновом нанореакторе (он рождается в синглетном спиновом состоянии из-за сохранения спина при переносе электрона), в котором отсутствует кулоновское притяжение, дислокация освобождается. Но ее освобождение ограничивается обстоятельством, что в синглетном спиновом нанореакторе быстро происходит обратный перенос электрона, возвращающий дислокацию в плененное состояние. Магнитное поле производит спиновую конверсию нанореактора из синглета в триплетное состояние, из которого обратный перенос электрона запрещен по спину. В результате магнитное поле увеличивает время жизни состояния с выключенным кулоном, то есть увеличивает вероятность освобождения дислокации.

Совокупность этих простых процессов легко представить схематически на примере NaCl с ионами Mg^{2+} как стопорами:

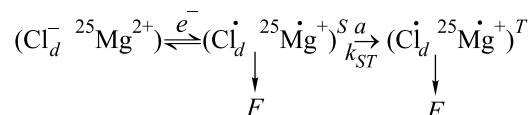


Здесь $(\text{Cl}_d^- \text{Mg}^{2+})_0$ – исходное состояние дислокации, плененной ионом Mg^{2+} (Cl_d^- обозначает ионный элемент дислокации, а точки – неспаренные электроны). Прямой перенос электрона e^- рождает спиновый нанореактор в синглетном состоянии S , а магнитное поле H переводит его в триплетное состояние T . Освобожденные дислокации F выходят из нанореактора в обоих его состояниях, S и T . Магнитно-индуцированная скорость освобождения дислокаций пропорциональна населенности нанореактора в состоянии T , которое заселяется с константой скорости k_{ST} спиновой конверсии из S в T . Так как S – T -конверсия управляется зеемановским взаимодействием, то

$$k_{ST} = |\Delta g \beta H|, \tag{1}$$

где Δg есть разность g -факторов партнеров в спиновом нанореакторе; при $\Delta g \approx 10^{-2}$ в поле $H = 5000$ Гс величина $k_{ST} \approx 1.5 \cdot 10^8 \text{ c}^{-1}$.

Теперь представим, что дислокация окажется плененной магнитно-изотопным ионом $^{25}\text{Mg}^{2+}$ (спин ядра $5/2$, магнитный момент -0.855 магнетона Бора, естественное содержание 11%):



В этом случае даже без внешнего магнитного поля S – T -конверсия в спиновом нанореакторе осуществляется локальным магнитным полем ядра ^{25}Mg , а скорость спиновой конверсии управляется сверхтон-

¹⁾e-mail: abuchach@chph.ras.ru

ким (фермиевским) электрон-ядерным взаимодействием a в парамагнитном ионе $^{25}\text{Mg}^+$. Величина его составляет 212 Гс [10], что соответствует

$$k_{ST} \approx |aI| \approx 1.5 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}, \quad (2)$$

где I – спин ядра ^{25}Mg . Таким образом, замещение бесспиновых, немагнитных ядер ^{24}Mg или ^{26}Mg магнитным ядром ^{25}Mg производит такое же воздействие на освобождение дислокаций и пластичность кристалла, как и внешнее магнитное поле с напряженностью 5000 Гс. Такого же магнитно-изотопного эффекта можно достичь заменой бесспинового ядра ^{40}Ca магнитным ядром ^{43}Ca в ионе Ca^{2+} (в природе это редкий изотоп, но технически он доступен).

Предсказанный здесь магнитно-изотопный эффект в пластичности диамагнитных кристаллов – следствие магнитного изотопного эффекта, известного в химии и биохимии спин-селективных процессов [11–13]. В сущности, освобождение дислокаций также управляется магнитным взаимодействием – зеемановским или сверхтонким; в первом случае это создает магнитопластичность, во втором случае это приводит к ядерно-изотопной пластичности.

Отметим еще одно важное обстоятельство: магнитно-изотопное замещение в ионных кристаллах будет всегда увеличивать их пластичность по механизму, описанному выше. Напротив, в ковалентных кристаллах (кремний, алмаз) введение магнитно-изотопных ядер (^{29}Si в кремнии, ^{13}C в алмазе) будет стимулировать закрепление дисло-

каций [14] и дислокационное упрочение кристаллов. Возможно, это явление может оказаться полезным в высокотехнологичных прикладных областях физики твердого тела.

Автор благодарен Министерству науки и образования России за финансовую поддержку (гранты НШ-#5236.2006.3 и ГК#02.445.11.7429).

1. А. А. Урусовская, В. И. Альшиц, А. Е. Смирнов, Письма в ЖЭТФ **65**, 470 (1997).
2. В. И. Альшиц, Н. Н. Беккауер, А. Е. Смирнов, А. А. Урусовская, ЖЭТФ **111**, 951 (1999).
3. В. И. Альшиц, Н. Н. Беккауер, А. Е. Смирнов, А. А. Урусовская, Известия РАН, сер. физ. **67**, 775 (2003).
4. В. В. Кведер, Ю. А. Осипьян, Изв. АН СССР, сер. физ. **51**, 626 (1987).
5. Ю. И. Головин, Р. Б. Моргунов, ЖЭТФ **115**, 605 (1999).
6. Ю. И. Головин, ФТТ **46**, 769 (2004).
7. Р. Б. Моргунов, УФН **174**, 131 (2004).
8. А. Л. Бучаченко, ЖЭТФ **129**, 909 (2006).
9. А. Л. Бучаченко, ЖЭТФ, в печати.
10. Н. Powell, M. van Eijkelenborg, W. Irvine et al., J. Phys. B **35**, 205 (2002).
11. A. L. Buchachenko, J. Phys. Chem. A **105**, 9995 (2001).
12. А. Л. Бучаченко, *Новая изотопия в химии и биохимии*, М.: Наука, 2006.
13. A. L. Buchachenko, Chem. Rev. **95**, 2507 (1995).
14. А. Л. Бучаченко, ЖЭТФ, в печати.