

скопические свойства, близкие к свойствам алмазной структуры [12,13].

Анализ колебательных свойств углеродных пленок, полученных при энергиях от 1 до 40 эВ, был проведен путем вычисления корреляционной функции скоростей атомов в процессе моделирования при температуре образца $T=5K$.

Как видно из рис. 7, на плотности состояний просматриваются два широких максимума около 20 и 50 ТГц, соответственно. Это отвечает вкладам сил сгиба и сил растяжения в колебание атомов. При снижении энергии осаждения углеродных пленок спектр фононов слабо смещается в сторону меньших частот. Недавно, был получен Рамановский спектр рассеяния тонкой углеродной пленки, которая имела высокую плотность sp^3 -связей [14]. Спектр Рамана алмазоподобной пленки имел широкие пики в областях частот, которые отличались от спектра алмаза. Полученная нами колебательная плотность демонстрирует подобное поведение, хотя спектр Рамана не вполне идентичен спектру фононов.

Заключение

Проведенное моделирование методом молекулярной динамики (с использованием классического потенциала Терсоффа) исследование роста аморфных углеродных пленок позволило на микроскопическом уровне изучить структурные, механические и колебательные свойства пленок в зависимости от энергии пучка. Установлено, что значения плотности и упругих модулей становятся близкими к таковым для алмаза при энергиях осаждения около 50 эВ, при этом concentra-

ция четырехкоординированных (алмазоподобных) атомов равна приблизительно 40%. Пленки, полученные при энергиях равных нескольким эВ, имеют графито-подобные свойства. Они содержат преимущественно sp^2 -связи, имеют низкие значения плотности и твердости. Обнаружено существование резкого перехода от графитоподобных структур к алмазоподобным, когда среднее координационное число достигает значения $Z_c \approx 3.3$. Этот переход имеет топологическую природу и связан с образованием неплоских колец атомов с sp^2 -связями, что приводит к образованию структуры с высокой плотностью и твердостью 12.

Библиографический список

1. A. S. Bakay, V. Yu Gonchar, S. V Krikun., G. Ya Lubarsky // *Functional Materials* 2, 222 (1995.)
2. J. Tersoff, *Phys. Rev. B* 37, 6991 (1988)
3. W. D. Luedtke and U. Landman, *Phys. Rev. B* 40, 11733 (1989)
4. Th. Frauenheim, P. Blaudeck, U. Stephan, and G. Jungnickel, *Phys. Rev. B* 48, 4823 (1993).
5. D. R. McKenzie, D. Muller, and B. A. Pailthorpe, *Phys. Rev. Lett.* 67, 773 (1991).
6. H. P. Kaukonen, and R. M. Nieminen, *Phys. Rev. Lett.* 68, 620 (1992)
7. F. Li and J. S. Lannin, *Phys. Rev. Lett.*, 65, 1905 (1990).
8. D. S. Franzblau, *Phys. Rev. B* 44, 4925 (1991).
9. J. J. Gilman, *J. Appl. Phys.*, 46, 5110 (1975)
10. H. Drickamer, in *Solid State Physics*, edited by F. Seitz and D. Turnbull (Academic, New York, 1965), Vol. 17, p. 1.
11. F. B. Bundy and J. S. Kasper, *J. Chem. Phys.* 46, 3437 (1967).
12. M. A. Tamor and C. H. Wu, *J. Appl. Phys.* 67, 1007 (1990).
13. P. C. Kelires, *Phys. Rev. B* 47, 1829 (1993)
14. W. S. Bacsa, J. S. Lannin, D. L. Pappas, and J. J. Cuomo, *Phys. Rev. B* 47, 10931 (1993)

УДК 533.9

ФИЗИКА ЭФФЕКТА ДАЛЬНОДЕЙСТВИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ВИДАХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПОВЕРХНОСТЬ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Д. И. Гетельбаум, Е. В. Курильчик, А. Ю. Азов, М. В. Гуткин
*Научно-исследовательский физико-технический институт
Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского*

Радиационное упрочнение металлов и сплавов методом ионной имплантации осуществляется обычно при весьма больших дозах облучения ($> 10^{17}$ см⁻²). Это требует

обработки в течение длительного времени при использовании установок с непрерывным пучком, либо применения мощных импульсных ионных пучков. Нами на протяжении ряда лет исследуется альтернативный метод — ионное облучение непрерывным (сканирующим) пучком при малых дозах (10^{13} - 10^{16} см⁻²) [1-6]. При этом длительность облучения составляет от нескольких секунд до нескольких минут. Преимущество данного метода состоит не только в сокращении длительности обработки, но и в том, что исключается значительный нагрев образцов и связанные с ним нежелательные побочные следствия (коробление, диффузия, окисление и т.д.). На примере фольг ряда металлов установлено, что такое облучение для структурно несовершенных металлов и сплавов приводит к далекодействующему изменению микротвердости (H), вплоть до противоположных сторон фольг с толщинами, по крайней мере, 20-100 мкм. Это явление мы назвали малодозным эффектом далекодействия (МЭД). Действие облучения в МЭД проникает через границы раздела стопок фольг, что позволяет свести к минимуму загрязнение их поверхности при облучении в невысоком вакууме.

Нами установлено, что закономерности МЭД обладают удивительной универсальностью. Для всех исследуемых материалов — *Cu*, *Al*, *Ta*, сплав пермаллоя, аморфного сплава *Fe-P-B-Ni* далекодействие имеет место при энергиях ионов выше пороговой, причем энергетический порог далекодействия практически одинаков ($\sim 30 \pm 5$ кэВ) и не зависит от дозы или плотности ионного тока. Доза, при которой эффект максимален (10^{15} см⁻²), также постоянна с точностью до множителя два. Такая универсальность является одним из важных преимуществ метода, поскольку она исключает дополнительные затраты на нахождение оптимальных режимов обработки. Недостаток МЭД заключается в сравнительно малых величинах достигаемого упрочнения (H возрастает для разных материалов от 10 до 30%), а также в сильной зависимости результата от исходного структурного состояния вещества. МЭД заметно выражен лишь

в далеких от равновесного состояния материалах. Заметим, что к ним относится большинство конструкционных материалов.

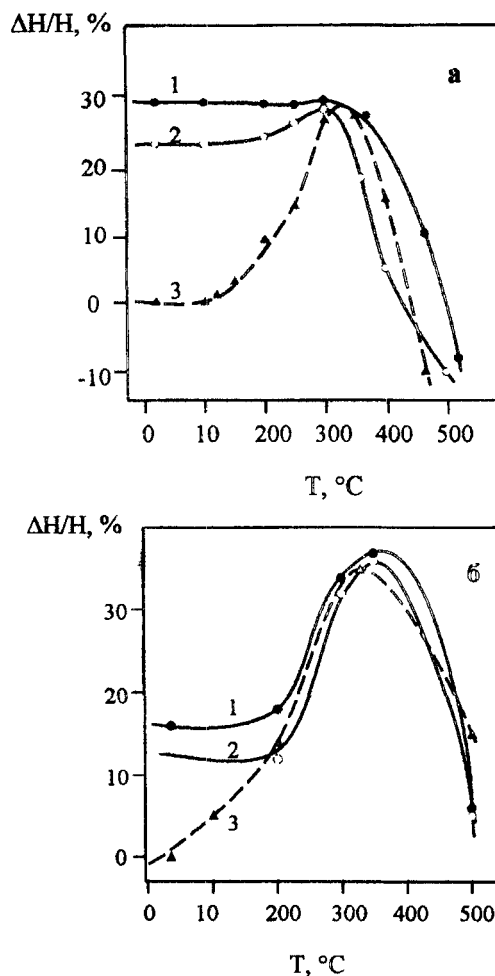


Рис 1 Зависимость относительного изменения микротвердости фольг пермаллоя-79 толщиной 20 мкм от температуры отжига а — облучение при комнатной температуре, б — облучение при температуре жидкого азота, 1 — облученная сторона фольги, 2 — необлученная сторона фольги, 3 — необлученная фольга

Изменения H отсчитываются относительно исходной (необлученной и неотожженной) фольги, на рис а) и б) кривые 3 относятся к разным сериям опытов

В данной работе на примере прокатанных фольг пермаллоя исследовано влияние температурного фактора в МЭД. Установлено, что термический отжиг при $T = 150$ - 300°C (без облучения) приводит к возрастанию H . При более высоких температурах отжига H уменьшается до исходного и даже более низкого уровня (рис. 1). Облучение при комнатной температуре ионами Ar^+

(энергия $E = 40$ кэВ, доза $\Phi = 10^{15}$ см⁻²), как и низкотемпературный отжиг, вызывает повышение H . При этом с облученной стороны H достигает значения $H_{\text{МАКС}}$, полученного при отжиге необлученного образца. С необлученной стороны повышение H несколько меньше, но последующий отжиг при 300°C доводит H до величины $H_{\text{МАКС}}$, после чего изменение микротвердости с температурой отжига почти повторяет ее ход для необлученного образца (рис. 1а). Качественно такое же поведение наблюдается и в случае облучения при температуре жидкого азота (рис. 1б).

Хотя под действием ионного пучка температура фольги несколько повышается, можно утверждать, что увеличение H при облучении не связано с нагревом. В пользу этого свидетельствуют данные для облучения при температуре жидкого азота. В этом случае достигается такое же повышение H , как при 200-градусном отжиге необлученного образца (рис. 1б), т.е. соответствует увеличению температуры ΔT под действием ионного пучка на 400°C. В наших условиях это исключено: прямые измерения показали, что ΔT не превышает 100°C. Таким образом, эти данные указывают на то, что изменения структуры при облучении идут в том же направлении, что и при низкотемпературном отжиге.

Однако облучение вызывает увеличение H не во всех случаях. Так, при облучении прокатанных, а затем отожженных фольг меди было обнаружено снижение микротвердости (таб. 1). Такое различие в поведении H указывает на влияние предистории образцов. Образцы пермаллоя перед облучением хранились в течение нескольких

лет. В случае прокатанных фольг меди, выдержанных в течение ряда лет, облучение также вызывает рост H , как сообщалось ранее [4,6]. В данной же работе образцы подвергались облучению либо сразу после прокатки, либо после низкотемпературного отжига прокатанных фольг.

Из табл. 1 видно, что величина и знак $\Delta H/H$ после облучения зависят от вида предрадиационной обработки. Из этой же таблицы следует, что не только облучение, но и химическое травление может вызывать изменение H . Интересно, что относительно «мягкая» обработка (химическое травление) приводит к более сильным изменениям по сравнению с более «жестким» воздействием (прокаткой).

Ранее [1-6] нами предложена модель, согласно которой за МЭД ответственны упругие волны (УВ), генерируемые в каскадах смещений. Установлено, что сорт иона не оказывает существенного влияния на величину эффекта: например, ионы He^+ , теряющие энергию преимущественно на электронное возбуждение, и ионы Kr^+ , для которых доминируют потери на упругие (атомные) столкновения, оказывают практически одинаковое действие.

Более того, МЭД имеет место и при облучении электронами с подпороговыми, т.е. не вызывающими смещения атомов, энергиями [6]. Следовательно, если в МЭД основную роль играет УВ, то они должны возникать не только непосредственно при передаче энергии бомбардирующих частиц атомам, но и при возбуждении электронной подсистемы, которое затем передается атомной подсистеме.

Таблица 1

Влияние различных видов обработок на микротвердость фольг меди М1.
Изменение отсчитано от значения H до соответствующего вида обработки

Вид обработки	1	2	3	4	4'	5	5'	6	6'
$\Delta H/H, \%$	12	0	15	-10	-10	-18	-17	-4	0

1 - утоньшение с 300 до 50 мкм путем химического травления, 2 - утоньшение с 300 до 50 мкм путем холодной прокатки; 3 - отжиг после прокатки (200° С, 30 мин); 4 - облучение после прокатки (Ag^+ , 40 кэВ, 2×10^{15} см⁻²), лицевая сторона фольги; 4' - то же, обратная сторона фольги; 5 - облучение после прокатки и последующего отжига (Ag^+ , 40 кэВ, 10^{15} см⁻²), лицевая сторона фольги; 5' - то же, обратная сторона фольги; 6 - облучение после химического утоньшения (Ag^+ , 40 кэВ, 10^{15} см⁻²), лицевая сторона фольги; 6' - то же, обратная сторона фольги.

В этом случае частоты УВ должны быть порядка дебаевской, т.е. 10^{13} с^{-1} . УВ с такими частотами очень быстро затухают [7] (на расстояниях порядка нескольких нанометров) и непосредственно не могут проникать через фольгу толщиной в десятки нанометров. С другой стороны, как было указано выше, МЭД имеет место только в объектах с высокой степенью структурного несовершенства. Учитывая эти обстоятельства, можно предложить следующий сценарий МЭД с участием УВ.

Первичные УВ, генерируемые под действием ионов, прежде чем затухнуть воздействуют на дефектно-примесную систему (атмосферы Коттрела АК) в окрестностях протяженных дефектов (ПД) и переводят ее в новое энергетическое состояние с другой конфигурацией. При этом испускаются вторичные УВ, которые воздействуют аналогичным образом на более глубоко расположенную часть АК. Таким путем процесс распространяется вдоль ПД (дислокаций, границ зерен и т.д.) на большие глубины, вызывая изменение свойств, в частности микротвердости. Этот цепной процесс аналогичен горению, но он не является термическим, так как локальное тепловое равновесие не успевает установиться. Тем не менее, он может вызывать такие же перестройки АК, что и низкотемпературная стадия отжига (например, для пермаллоя при $T_{\text{отж}} < 300^\circ\text{C}$). Естественно, что при указанном сценарии результат облучения должен зависеть от предыстории образца, т.е. от состояния АК, а также от степени дефектности.

Обсуждение универсального характера закономерностей МЭД на основе представления о роли УВ было проведено нами в более ранних работах [4-6].

С точки зрения данной модели, различия в поведении фольг пермаллоя и отожженных после прокатки фольг меди можно объяснить разным состоянием ПД перед облучением. Для фольг пермаллоя ПД за время длительного хранения успевают нарастить АК. Образовавшиеся в результате прокатки медных фольг ПД, по-видимому, лишены АК. При отжиге АК формируются, но являются нестабильными, и при последую-

щем облучении переходят в новое состояние. Сказанное не противоречит универсальности закономерностей, о которых говорилось выше. Величина и знак изменения свойств могут варьироваться, но при этом остаются неизменными пороговое значение энергии, немонотонный характер дозовой зависимости и значения доз (вблизи 10^{15} см^2), при которых эффект максимален.

Изменения свойств материалов, в которых проявляется эффект дальнего действия, имеют место не только при ионном или электронном облучении, но и при других видах воздействия на поверхность твердых тел: шлифовке, трении, химическом травлении и др. [4,8]. При этом обнаруживается ряд общих черт, такие как прохождение воздействия через границы раздела сред, чувствительность величины эффекта к степени дефектности. Мы полагаем, что эти явления имеют общую природу, связанную с генерацией УВ и их воздействием на дефектную систему твердого тела, преимущественно на АК протяженных дефектов.

Выше указывалось на активную роль, которую может играть в эффекте дальнего действия электронная подсистема в качестве промежуточного звена передачи энергии от внешнего источника к атомной подсистеме. Наиболее ярко эта роль выступает в недавно обнаруженном нами эффекте механической фотопамати [9, 10]. Обнаружено, что при кратковременном и малоинтенсивном (не нагревающим) облучении фольг пермаллоя фотонами с $\lambda = 0,95 \text{ мкм}$ происходит изменение H , наиболее выраженное с необлученной стороны. Была высказана гипотеза, что при фотонном облучении из металла выбиваются фотоэлектроны в слой поверхностного окисла (ионный диэлектрик), которые приводят из-за кулоновских сил к генерации УВ. Последние проникают в металл, а далее события развиваются по тому же сценарию, что и при ионном облучении.

Если эта гипотеза верна, то следует ожидать сходства в поведении металлических фольг при фотонном и ионном облучении. Один признак сходства уже был продемонстрирован в [9, 10] – немонотонная зависимость H от длительности облучения.

Другой признак – неодинаковое изменение H с необлученной и обратной сторон фольги. Правда, знак этой разницы в работах [9, 10] противоположен тому, который наблюдается при ионном облучении. Это отличие можно объяснить усилением УВ по мере их распространения при взаимодействии с дефектами [11], которое проявляется по-разному при ионном и фотонном облучениях из-за различия в локализации области первичной генерации УВ.

Так как одной из характерных особенностей МЭД является проникновение воздействия через границы раздела в стопках фольг, мы проделали аналогичные эксперименты с фотонным облучением.

Использовались фольги пермаллоя (см. выше) и фольги меди М1. Одни из медных фольг толщиной 50 мкм были получены путем химического утоньшения толстых фольг (300 мкм), другие – путем прокатки тех же фольг до толщины 50 мкм. Часть прокатанных фольг подвергалась отжигу (200°С. 30 мин). Стопки из двух контактирующих фольг подвергались в одном случае ионному облучению (Ar^+ , 40 кэВ, 10^{15} см⁻²), в другом – облучению светом галогенной лампы (300 Вт) со световой плотностью мощности ~ 1 Вт/см² в течение 10 с. Для устранения нагрева экранируемые фольги приводились в плот-

ный контакт с фланцем с помощью тонкого слоя вакуумной смазки (результат, однако, не зависел от наличия смазки, что еще раз указывает на нестермический характер влияния облучения).

Данные, приведенные в табл.2, показывают, что действие фотонного, как и ионного облучения, проникает через экранирующую фольгу, причем изменения H при обоих видах облучения качественно аналогичны и идентичным образом зависят от способа предварительной обработки фольг. (Изменения H в случае фотонного облучения нестабильны и релаксируют в течение нескольких суток; эффект релаксации требует специального изучения).

Итак, казалось бы, при весьма различных видах воздействия на поверхностные слои твердого тела имеют место сходные явления (эффект дальнего действия). Этот факт можно интерпретировать таким образом: возбуждения решетки, возникающие при воздействиях на поверхность, передаются с помощью УВ (с участием дефектов) в более глубокие слои. Те же процессы, по-видимому, могут иметь место при любых обработках (не только поверхностных), сопровождающихся превращениями в системе дефектов, например, при пластической деформации, мартенситных превращениях и т.д.

Таблица 2

Изменения H (%) при ионном (Ar^+ , 40 кэВ, 10^{15} см⁻²) и фотонном облучениях стоек фольг пермаллоя и меди

Материал и вид предварит. обработки экранирующей фольги	Материал и вид предварит. обработки экранированной фольги	Ионное облучение				Фотонное облучение			
		Верхняя (экранирующая) фольга		Нижняя (экранированная) фольга		Верхняя (экранирующая) фольга		Нижняя (экранированная) фольга	
		Верх. стор.	Ниж. стор.	Верх. стор.	Ниж. стор.	Верх. стор.	Ниж. стор.	Верх. стор.	Ниж. стор.
Перм.; 1	Перм.; 1	32	28	22	19	22	21	17	13
Медь; 2	Медь; 3	-6	-1	-22	-14	-1	0	-11	-11
Медь; 3	Медь; 3	-12	-21	-12	-14	-14	-15	-11	-9

Примечание Цифры в первых двух колонках обозначают вид предварительной обработки: 1 – прокатка с последующей длительной (> 5 лет) выдержкой; 2 – прокатка без длительной выдержки; 3 – отжиг при 200° С (30 мин) после прокатки. Измерения после фотонного облучения проводились спустя не более двух часов.

Данное явление может быть выражено слабее или сильнее (в зависимости от состояния дефектной подсистемы и вида воздействия), может маскироваться другими процессами, но в общем случае носит, по видимому, универсальный характер.

При условии более детального исследования характера и масштабов влияния рассматриваемого эффекта он может быть положен в основу разработки новых дешевых и эффективных способов улучшения свойств материалов. Особенно привлекателен с точки зрения дешевизны и простоты способ, основанный на малоинтенсивном ($\sim 1 \text{ Вт/см}^2$) фотонном облучении.

Работа выполнена в рамках межвузовской научно-технической программы «Взаимодействие атомных частиц с поверхностью – новые методы и технологии».

Библиографический список

1. Павлов П. В., Тетельбаум Д. И., Курильчик Е. В. и др. // Высокочистые вещества. – 1993. – № 4. – С.26.

2. Павлов П. В., Тетельбаум Д. И., Курильчик Е. В. // Металлы. – 1993. – №3. – С.78.
3. Тетельбаум Д. И., Курильчик Е. В. // Высокочистые вещества. – 1995. – №2. – С.98.
4. Тетельбаум Д. И., Перешоаков В. А., Латышева Н. Д., и др. // Известия РАН. Сер.физ. – 1998. – Т. 62. – Вып.4. – С.861.
5. Тетельбаум Д. И., Курильчик Е. В., Доцент Е. Е. // Вестник Нижегородского госуниверситета. Сер. Физика твердого тела. – 1998. – № 2. – С. 140.
6. Tetelbaum D. I., Kuriichik E. V., Latisheva N. D. // Nuclear Instruments and Methods in Physical Research. 1997. V. B127/128. P.153.
7. Такер Дж., Рэмpton В. Гиперзвук в физике твердого тела. – М.: Мир. 1975. – 329 с.
8. Перешоиков В. А., Скупов В. Д. Особенности абразивной и химической обработки поверхности полупроводников. – Н. Новгород: ННГУ, 1992. – 198 с.
9. Тетельбаум Д. И., Трофимов А. А., Курильчик Е. В. и др. // Письма в ЖТФ. 1998. – Т.24. – Вып. 23. – С.9.
10. Тетельбаум Д. И., Трофимов А. А., Курильчик Е. В. и др. // Вестник Нижегородского госуниверситета. Сер. Физика твердого тела. – 1998. – Вып. 2. – С. 157.
11. Семин Ю. А., Скупов В. Д., Тетельбаум Д. И. // Письма в ЖТФ. – 1988. – Т. 14. – Вып. 3. – С. 273.

УДК 533.9

КОМПЛЕКСНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВАКУУМНО-ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ

С. С. Алимов, А. А. Бизюков, В. В. Бобков, Д. Л. Рябчиков
Харьковский госуниверситет

Физико-технический факультет Харьковского госуниверситета предлагает разработку технологических комплексов (ТК) вакуумно-плазменного нанесения покрытий.

Состав покрытий определяется их функциональным назначением: антикоррозионные, упрочняющие, декоративные, специального назначения. Системы нанесения позволяют получать покрытия металлов, сплавов, их окислов, нитридов, карбидов, α -С:Н. Прочность схватывания покрытия с подложкой соизмерима с прочностью материала изделия или покрытия. Толщина покрытия определяется техническим заданием. Чистота обработки напыленной поверх-

ности соответствует состоянию поверхности исходного изделия. ТК может быть реализован под нанесение многослойных покрытий.

Модификации технологических комплексов конструктивно различаются в зависимости от их функционального назначения при нанесении покрытий.

1. В качестве одного из них предлагается технологический комплекс для низкотемпературного вакуумно-плазменного нанесения многослойных покрытий на рулонные материалы, в частности, на полиэтиленовые ленты.

Технологический комплекс представляет собой вакуумную установку полунепрерывного типа, состоящую из четырех