

# **ПРИРОДА**

№ 4, 2005 г.

**Д.И. Тейтельбаум, В.Я. Баянкин**

## **Эффект дальнего действия**

© “Природа”

Использование и распространение этого материала  
в коммерческих целях  
возможно лишь с разрешения редакции



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”  
(грант РФФИ 03-07-90415)

[vivovoco.nns.ru](http://vivovoco.nns.ru)  
[vivovoco.rsl.ru](http://vivovoco.rsl.ru)  
[www.ibmh.msk.su/vivovoco](http://www.ibmh.msk.su/vivovoco)

# Эффект дальногодействия

Д.И.Тетельбаум, В.Я.Баянкин

Термин «дальноедействие» вызывает в памяти людей, изучавших историю физики, дискуссию, которая восходит еще ко временам И.Ньютона: тогда это понятие означало передачу возмущения от одного тела к другому без участия промежуточной среды. Однако в названии эффекта, о котором пойдет речь здесь, термин употребляется в ином смысле. Когда малое тело на большой скорости сталкивается с большим (например, пуля врывается в дерево или метеорит падает на Землю), оно оставляет в нем след — повреждение. Спрашивается, как глубоко проникает повреждение? Естественно, вопрос требует уточнения: глубоко — по сравнению с чем? Если малое тело (снаряд) застревает в большом, то мерой глубины служит расстояние, которое пробегает снаряд до точки застревания («пробег» снаряда). Когда повреждение распространяется далеко за пределы пробега, разумно говорить о дальноедействии. В отличие от ньютоновского термина, участие среды в такой формулировке явно подразумевается. Мы не будем рассматривать здесь вопросы, связанные со столкновением макроскопических тел, например, распространение трещины при ударе. Нас интересу-

© Тетельбаум Д.И., Баянкин В.Я., 2005



*Давид Исаакович Тетельбаум, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского физико-технического института Нижегородского государственного университета им.Н.И.Лобачевского. Область научных интересов — физика твердого тела, физика полупроводников, ионная имплантация.*



*Владимир Яковлевич Баянкин, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией электронной структуры поверхности Физико-технического института УрО РАН (Ижевск). Занимается физикой металлов и радиационной физикой твердого тела.*

ют явления при взаимодействии микрочастиц с твердыми телами и родственные процессы на атомарном уровне, приводящие к «макроскопическим» последствиям.

## Белое пятно теории: «дальнобойные» ионы

Эффект дальноедействия применительно к ускоренным атомарным частицам был открыт на рубеже 60-х и 70-х годов прошлого века в ходе исследования процессов при внедрении в твердые тела ускоренных ионов. Интерес к этим процессам связан с так называемой ионной имплантацией, играющей первостепенную роль при

изготовлении электронных приборов. «Сердцеви-на» подобных приборов — полупроводниковые интегральные схемы, транзисторы, диоды, создаваемые путем внедрения в полупроводник ионов легирующих примесей. Для этого атомы нужного химического элемента переводят в ионизованное состояние, ионы ускоряют электрическим полем до энергий порядка десятков и сотен тысяч электронвольт и «бомбардируют» ими поверхность полупроводника. Проникая на определенную глубину в тело полупроводника, ионы застревают в нем, меняют в некотором слое его тип проводимости и образуют *p-n*-переход — основной элемент полупроводниковых приборов. Описанный процесс и называется ионной имплантацией. Но «профессии» ионной имплантации не ограничиваются созданием *p-n*-переходов. Она применяется и для формирования диэлектрических слоев при изготовлении специальных типов интегральных схем, и в обработке металлов для упрочнения, и для повышения коррозионной стойкости ответственных деталей машин, и даже в медицине — для обработки трущихся поверхностей искусственных суставов — протезов. Это далеко не полный список.

Из сказанного ясно, что вопрос о глубине, на которой происходит изменение свойств вещества при внедрении ионов, — отнюдь не праздный и интересует не только ученых, но и инженеров, технологов, специалистов различных отраслей науки и техники. Однако если задать такой вопрос специалистам по ионной имплантации, подавляющее большинство их ответят, что он давно решен: свойства изменяются приблизительно до той глубины, на которую проникают ускоренные ионы. Ведь теория пробегов ионов в твердых телах хорошо разработана и надежно проверена. Пробег зависит от сорта и энергий ионов, а также от самого вещества мишени. Они несколько различаются в аморфных и кристаллических телах. В последних пробег возрастает, если направление ионов совпадает с одной из главных кристаллографических осей. В этом случае часть ионов движется в каналах между плотноупакованными рядами атомов; тогда говорят об эффекте каналирования. Но во всех случаях пробег при обычных энергиях ионов (порядка десятков килоэлектронвольт) весьма малы и составляют менее 0.1—1 мкм или немного больше.

Столь малая величина пробегов следовала из теории и в огромном большинстве случаев подтверждена экспериментально. На этом, кстати, основано одно из главных применений ионной имплантации — создание мелких *p-n*-переходов в полупроводниках для интегральных схем и других электронных приборов.

Первое «облачко» сомнений в универсальности подобных представлений появилось в конце 60-х годов прошлого века. Исследуя толщину слоя, в котором при облучении ионами изменя-

ются времена жизни неосновных носителей заряда и постоянная решетки в кремнии, группа нижегородских исследователей с участием одного из авторов данной статьи обнаружила, что изменения простираются до глубин в десятки микрометров [1]. А вскоре было установлено [2] изменение дислокационной структуры монокристаллической кремниевой пластины толщиной в сотни микрометров на стороне, противоположной облучаемой! Тогда и появился термин «эффект дальнего действия» (возможно, не вполне удачный: как говорилось выше, он уже был введен ранее, но в других целях; однако в настоящее время термин укоренился и вряд ли стоит его пересматривать). Конечно, данный эффект не опрокидывает традиционных представлений ионной имплантации, но дополняет их новыми аспектами.

На первый взгляд, в эффекте нет ничего удивительного. Сами ионы проникают на очень малую глубину. Но, сталкиваясь с атомами, они выбивают их из узлов; смещенные атомы, обладая большой кинетической энергией, выбивают другие атомы и т.д. — каждый ион в конечном итоге создает на своем пути сотни и тысячи точечных дефектов — вакансий и междоузельных атомов (развивается лавина — каскад смещений, рис.1). Давно известно, что подобные дефекты очень подвижны; диффундируя из области торможения ионов, они в принципе могут проникнуть очень глубоко и изменить свойства твердого тела.

Однако расчеты показали, что за исключением некоторых специальных случаев такой механизм

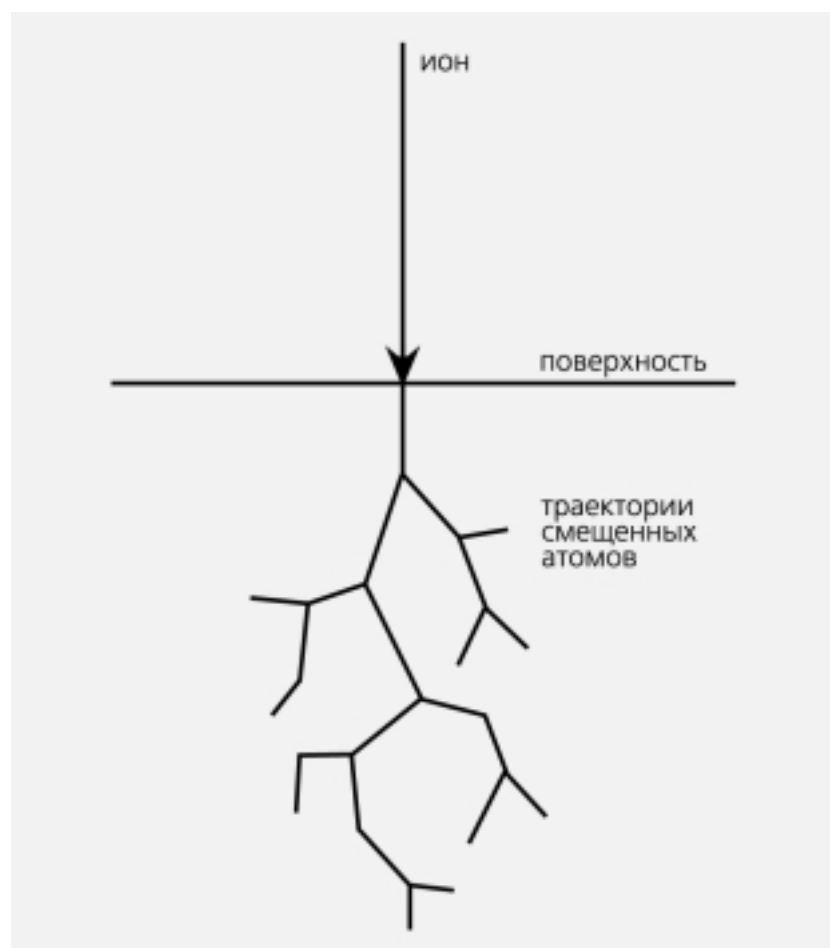


Рис.1. Схематическое изображение каскада атомных смещений при ионном облучении.

не может объяснить наблюдаемый эффект. Даже если все образованные дефекты дойдут до противоположной стороны пластины, их все равно не хватит, чтобы, например, вызвать перемещение дислокаций. В действительности же лишь ничтожно малая доля дефектов может проникнуть на большие глубины, так как основная масса их гибнет по пути вследствие рекомбинации, а другая часть связывается в малоподвижные комплексы.

Вскоре выяснилось важное обстоятельство. Оказалось, что эффект резко усиливается, если пластины кремния перед облучением подвергнуть специальной обработке, а именно — термическому окислению. Известно, что при этом в поверхностном слое кремния возникают крупные («протяженные») дефекты — так называемые дефекты упаковки (когда нарушается порядок чередования кристаллических плоскостей). И тогда нами была предложена следующая модель [3].

Ион, сталкиваясь с поверхностью, производит своего рода микровзрыв, порождая высокочастотную акустическую волну (такие волны называются гиперзвуковыми). Характерная частота этих волн — порядка обратной длительности возмущения, связанного либо с локальным разогревом вещества в треке иона («тепловой» пик), либо с преобразованием дефектов, возникающих вдоль трека («пик смещения»). Оба времени составляют обычно  $10^{-11}$ – $10^{-12}$  сек. Как правило, волны быстро затухают и сами по себе не могут достичь обратной стороны пластины. Но, встречая на своем пути протяженные дефекты (например, дефекты упаковки), они вызывают их перестройку, которая сопровождается испусканием вторичных волн, и т.д. (рис.2). Возникает своего рода цепной процесс, который в конечном счете способен охватить всю толщу пластины и привести к изменению ее свойств. Оценки [3] показали реальность такого сценария, по крайней мере для кремния.



Рис.2. Цепной процесс генерации акустических волн. Для наглядности изображены только два дефекта. Масштаб не выдержан.

## В металле вот что происходит...

До сих пор речь шла о монокристаллических полупроводниках. Но с еще более странными проявлениями эффекта мы столкнулись для металлов [4, 5]. Ионному облучению подвергались прокатанные поликристаллические образцы ряда чистых металлов и сплавов толщиной несколько десятков и сотен микрометров (фольга). Дальнейшее влияние облучения на их механические свойства проявилось в том, что после облучения изменяется микротвердость как с облученной («лицевой»), так и с обратной стороны фольги. Об изменении микротвердости судят по глубине отпечатков от алмазной пирамидки, вдавливаемой в образец при определенной нагрузке. При этом зондируется слой, сравнимый по толщине с глубиной отпечатка (обычно порядка 1 мкм). Следует заметить, что дальнейшее влияние ионного облучения на структуру и свойства металлов было обнаружено во многих лабораториях (под руководством М.И.Гусевой, Ю.П.Шаркеева, В.С.Хмелевской и других ученых). Но речь там шла о высоких дозах (более  $10^{16}$  см<sup>-2</sup>) и (или) мощных импульсных пучках, когда распространение «возмущения» на большие глубины можно было объяснить, например, пластической деформацией, связанной с генерацией и движением дислокаций под действием либо напряженного приповерхностного слоя, либо термоупругих напряжений и ударных волн. В нашем случае дозы были  $10^{13}$ – $10^{16}$  см<sup>-2</sup>. При таких дозах в указанных работах сколь-нибудь заметного перераспределения дислокаций, по утверждению авторов, не наблюдалось.

Закономерности данного явления, которое было названо малодозным эффектом дальнего действия, оказались довольно неожиданными. Эффект имеет пороговый по энергии ионов ( $E$ ) характер: когда  $E \geq 30$  кэВ, изменения свойств наблюдаются с обеих сторон фольги, а при меньших  $E$  — только вблизи облученной стороны. Возможно, наличие энергетического порога было бы не так удивительно, если бы его величина зависела от различных факторов. Но оказалось, что порог универсален: он почти не зависит ни от сорта ионов, ни от вида металла, ни от толщины фольги (по крайней мере, для тех объектов, в которых данный эффект изучался), ни от плотности ионного тока.

Другая странность: обычно изменение свойств при внешних воздействиях тем сильнее, чем выше доза, характеризующая воздействие; в нашем случае изменение микротвердости оказалось немонотонной функцией дозы — существуют один или несколько максимумов (рис.3).

Следующий удивительный факт. Если под облучаемой фольгой поместить другую фольгу из того же или другого материала, то изменение микротвердости происходит и в ней, т.е. влияние облучения распространяется через границу раздела.

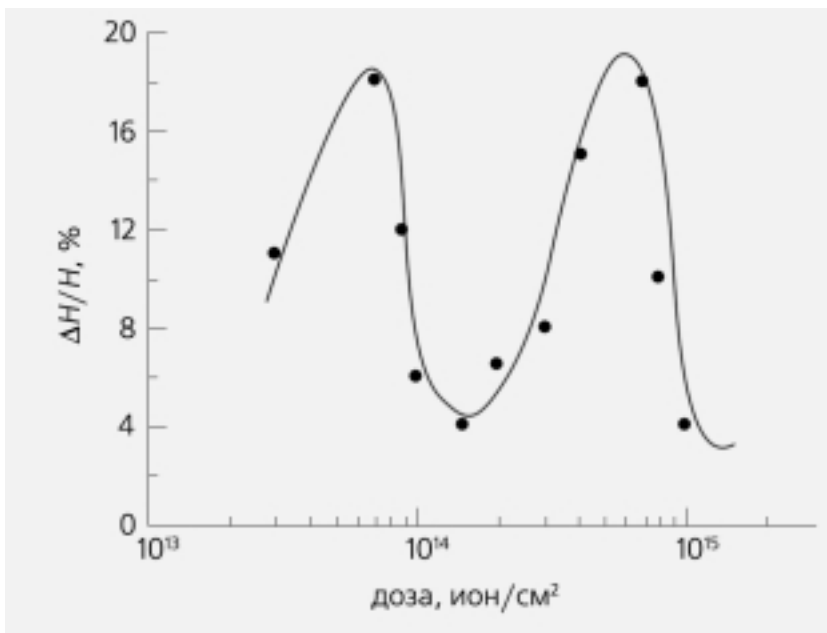


Рис.3. Зависимость относительного изменения микротвердости от дозы ионов  $Ag^+$  ( $E = 100$  кэВ) для фольги сплава пермаллой-79.

Это явление наблюдалось в стопках не только из двух, но даже трех, четырех и более образцов, каждый из которых имел толщину несколько десятков микрометров.

И уж совсем странное обстоятельство обнаружилось, когда между облучаемым и экранируемым кусочками фольги был создан вакуумный зазор, ширина которого достигала  $\sim 1$  см: оказалось, что если экран не слишком толстый (для пермаллой-79 — 20 мкм и менее), изменения в нижней фольге все равно наблюдаются! Порог по энергии имеет место и в системах из нескольких образцов: если энергия ионов меньше 30 кэВ, то изменения происходят только вблизи облучаемой поверхности верхней фольги.

### Не ионами едиными...

Мы задались вопросом: а только ли при ионном облучении имеет место эффект дальнего действия? Сначала в качестве альтернативы был испытан электронный пучок. Выяснилось, что при облучении фольги электронами с энергиями 40–70 кэВ происходят такие же дальнедействующие изменения микротвердости, как и при облучении ионами! При этом и дозовые зависимости изменения микротвердости оказались близкими для обоих видов излучений.

Затем было испытано действие световых потоков — сначала лазерных (с длиной волны 0.95 мкм и мощностью 1 Вт), а затем и некогерентных — от галогенной лампы мощностью 300 Вт и лампы накаливания мощностью 20 Вт [5–9]. И оказалось: свет, проникая на глубины менее 1 мкм, тоже меняет микротвердость на обратной стороне фольги, причем дозовая зависимость эффекта опять получилась в основном такой же, как при ионном

облучении (рис.4). Примечательно, что интервал доз, в котором наблюдается эффект, ограничен не только снизу (что естественно), но и сверху. Эта закономерность имела место для всех исследованных металлов (порядка десяти), хотя характер дозовых зависимостей различался. (Когда речь идет о дозовой зависимости, нужно уточнить понятие дозы. В случае ионов или электронов принято измерять дозу в числе частиц, упавших на  $1 \text{ см}^2$  поверхности. Но энергии фотонов на четыре порядка величины меньше, чем у ионов или электронов. Поэтому сравнивались не потоки, а суммарные энергии частиц, приходящиеся на единицу поверхности, в Дж/см<sup>2</sup>. Именно в этих единицах и было обнаружено подобие дозовых зависимостей эффекта.)

После того, как были получены эти удивительные результаты, возникла мысль: а не является ли изменение микротвердости тривиальным следствием нагрева образцов при облучении? Тогда результаты можно было бы объяснить, например, термическим отжигом дефектов или короблением фольги; стало бы понятно подобие результатов для разных видов излучений — в этом случае важна лишь мощность и количество энергии, поступившей на образец. Это предположение, которое могло опровергнуть существование эффекта дальнего действия как такового, было нами тщательно проверено; оказалось, что изменения не зависят от условий, при которых степень нагрева специально варьировалась в разумных пределах; изменения происходят даже в случае практически полного отсутствия нагрева. Следовательно, такое простое объяснение не проходит.

При изучении действия света выявились некоторые новые любопытные особенности. Во-первых (в отличие от случая ионного облучения), микротвердость обычно слабо изменялась на облучаемой поверхности, тогда как на противоположной стороне фольги (а также в экранированной фольге) изменения достигали десятков процентов. Во-вторых, что наиболее существенно, влия-

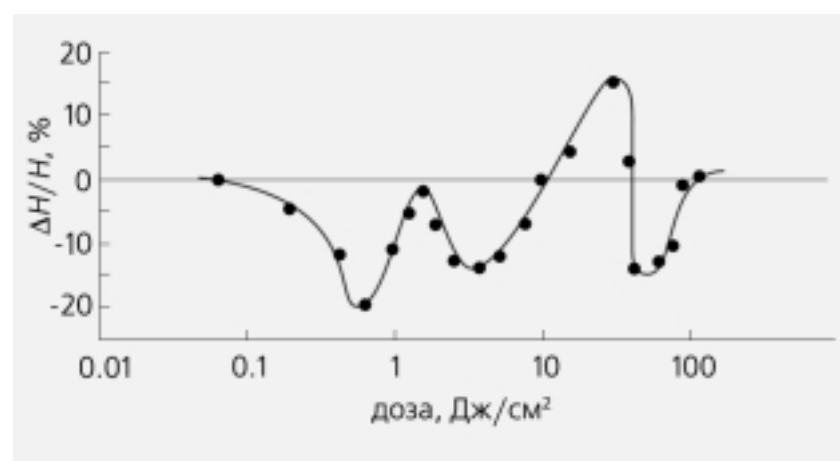


Рис.4. Зависимость относительного изменения микротвердости от дозы облучения светом (лампа накаливания мощностью 20 Вт) для фольги сплава пермаллой-79.

ние облучения отсутствовало в тех случаях, когда перед облучением с фольги удалялся (путем химического травления) естественный окисел, обычно присутствующий на поверхности. Если же образец после стравливания окисла некоторое время выдерживался на воздухе перед облучением, то по мере увеличения времени выдержки (следовательно, толщины окисла) эффект проявлялся, сначала слабо, затем при дальнейшем возрастании времени выдержки становился все более заметным, а при выдержке порядка 0.5 ч достигал насыщения. Заметим, что мы имеем дело с практически прозрачными для видимого света окисными пленками, толщины которых, как правило, были очень малы (менее 10 нм) по сравнению с толщиной фольги (десятки мкм) и которые сами по себе не влияли на значение микротвердости.

Еще одно отличие от случая ионного облучения заключается в долговечности изменений. При ионном облучении изменения «живут» по крайней мере в течение многих месяцев и даже лет, а при облучении светом они обычно уменьшаются (релаксируют) в течение нескольких часов или десятков минут, хотя в ряде случаев остаточные изменения сохраняются и релаксируют гораздо медленнее. (Впрочем, и в случае ионного облучения пока нельзя полностью исключить влияние окисла и наличия быстрой стадии релаксации, технически трудно наблюдаемой.)

Возникает вопрос, а что было известно о влиянии слабых (практически не нагревающих) потоков света на свойства твердых тел? Естественно, мы оставляем в стороне такие широко известные воздействия света, как фотохимическое (фотография), фотодеструктивное (разрушение полимеров) и т.п.: это явления совсем другого ряда. Известен был фотомеханический эффект, заключающийся в том, что если во время измерения микротвердости образец со стороны измерения подвергался засветке, то значение микротвердости изменялось. Но, во-первых, это явление изучалось почти исключительно для неметаллических материалов; во-вторых, засветка проводилась непосредственно во время или, в крайнем случае, за несколько минут до измерения (утверждалось, что при более длительных временных интервалах изменения отсутствуют); и, в-третьих, не было никаких данных о далекодействующих изменениях. Известна работа [10], где были обнаружены структурные изменения в металлах (либо в пленках, либо в тонких приповерхностных слоях фольги вблизи облучаемой стороны), регистрируемые после облучения вакуумным ультрафиолетом. В этом случае кванты излучения обладали энергией, достаточной для реализации механизма так называемого распада электронных возбуждений [11]. При облучении светом видимого диапазона предложенную в [10] модель непосредственно использовать нельзя.

## Где искать причину?

Каков же механизм обнаруженных нами явлений? Выше было сказано, что в случае ионного облучения мы полагали ответственными за эффект далекодействия гиперзвуковые волны. Но могут ли такие волны возникать в случае светового облучения? На первый взгляд, это трудно себе представить: фотоны светового диапазона в отличие от ускоренных ионов не создают в твердом теле каскадов смещений атомов, а электронные возбуждения в металлах чрезвычайно быстро затухают вследствие высокой концентрации свободных электронов. Подсказку дает тот факт, что эффект фотопамати металлов требует присутствия естественного окисла на облучаемой поверхности. Как правило, это диэлектрик, состоящий из положительных и отрицательных ионов, в котором электрические поля ионов взаимно компенсируются. Вспомним также, что существует явление фотоэффекта — выбивание электронов из металла фотонами. Предположим, что выбитый из металла электрон не вылетает наружу, а «застревает» в пленке естественного окисла (это так называемый внутренний фотоэффект) и тем самым локально нарушает взаимную электрическую компенсацию полей ионов. (Энергетический порог для квантов света при внутреннем фотоэффекте может быть существенно ниже, чем при внешнем.) Нарушение равновесия сил межатомных взаимодействий «расшевелит» окружающие атомы (ионы) окисла — зародится гиперзвуковая волна (рис.5). Эта волна проникнет в металл, а дальше все пойдет по тому же сценарию, что и при ионном облучении (см. рис.2).

Можно было бы обсудить и более простую модель. Свет хотя и незначительно, но все же нагревает фольгу. При наличии на ней естественного окисла (несколько отличающегося по толщине с двух сторон) и различии коэффициентов термического расширения металла и окисла возникает неоднородное поле упругих напряжений. Если интенсивность света подвержена некоторым

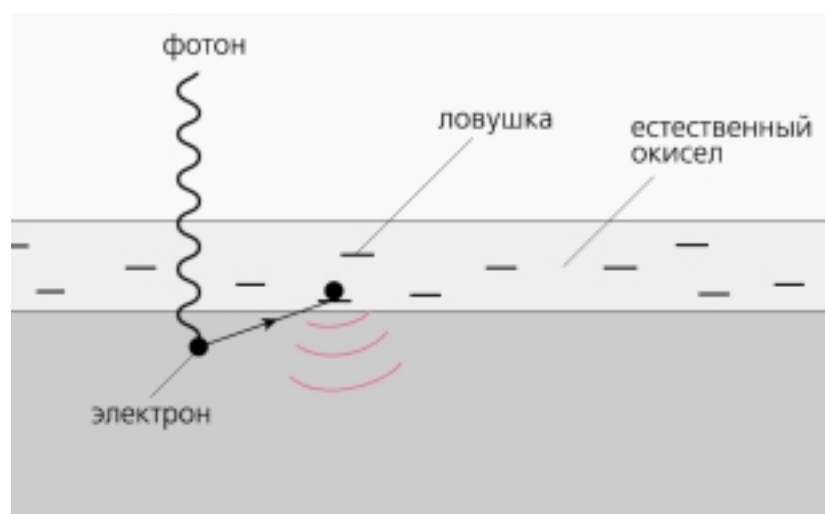


Рис.5. Схема внутреннего фотоэффекта и зарождения гиперзвуковой волны.

флуктуациям, это приведет еще и к механическим колебаниям, которые в принципе могут инициировать процессы перестройки дефектов в металле. Однако против такой гипотезы свидетельствуют три факта. Во-первых, толщины окислов несопоставимо малы по сравнению с толщиной фольги, так что напряжения тоже очень малы. Во-вторых, эффект в этом случае должен быть чувствителен к термическим условиям при облучении, например, к качеству теплового контакта между фольгой и массивной подложкой, а это не имеет места. Наконец, удаление перед облучением окисла со стороны, противоположной облучаемой, которое должно было бы привести к изменению термомеханических напряжений, не оказывает существенного влияния (в отличие от удаления окисла с облучаемой стороны). Таким образом, модель, связанная с выбиванием фотоэлектронов, выглядит предпочтительнее.

Конечно, и эта модель не дает ответа на ряд вопросов. Как, например, объяснить близость формы дозовых зависимостей при различных видах облучения? Данный факт наводит на мысль, что основную роль в эффекте дальнего действия играет поток энергии, поступающий на поверхность, а не конкретный вид энергии, от которого зависит лишь инициирование процессов и долговечность возникших изменений. Вероятно, мы столкнулись с довольно распространенным явлением, имеющим место при взаимодействии относительно слабых потоков энергии с неравновесными системами. Видимо, здесь нужен общий подход, в частности, привлечение теории фазовых переходов. Однако, несмотря на обилие теоретических работ по фазовым превращениям в твердых телах, существует мало публикаций, которые можно было бы использовать для интерпретации нашего эффекта.

Трудно пока понять, как воздействие облучения передается через вакуумный зазор (в случае ионного облучения). При использованном нами вакууме ( $\sim 10^{-3}$  Па) разрежение столь велико, что не может быть и речи о передаче энергии через волны в остаточном газе. Можно лишь предположить, что в качестве «передаточного звена» в этом случае выступает эмиссия частиц (электронов или ионов) с обратной стороны экранирующей фольги в результате процессов, развивающихся под действием гиперзвуковых волн. Речь идет не о прямом превращении энергии гиперзвуковых волн в кинетическую энергию эмитированных частиц, а о вторичных превращениях, происходящих в системе дефектов, когда возможно усиление эмиссионных явлений при цепных (коллективных) процессах. Пример подобных процессов был нами рассмотрен в [3] применительно к изменению структуры кремния. Часто выдвигаемые против такой гипотезы аргументы, связанные с законом сохранения энергии, несостоятельны, поскольку открытость изучаемых си-

стем, наличие коллективных процессов и эффекта «спускового крючка» вполне обеспечивают совместимость данной модели с законом сохранения энергии.

Трудно объяснить и тот факт, что при облучении светом микротвердость может слабо изменяться на облучаемой стороне, в то время как на обратной стороне изменения гораздо сильнее. Возможно, тепловые фононы, хаотически генерируемые в скин-слое при поглощении квантов света, вызывают своего рода «шум», препятствующий процессу трансформации локализованных в этом слое дефектов. Разумеется, пока это только догадки. Теоретическое осмысление эффекта дальнего действия находится еще в начальной стадии.

В прикладном отношении, независимо от его физической природы, эффект весьма интересен. Изменение микротвердости уже само по себе может оказаться полезным для многих технических приложений. А главное — оно сигнализирует об изменении и других свойств металла. Если это так, то мы получаем новый способ модификации свойств. Особенно заманчиво было бы использовать световые пучки — ведь это технологически предельно просто и не требует ни вакуумного, ни какого-либо другого сложного оборудования!

У читателя, естественно, может возникнуть вопрос: почему такое, казалось бы, лежащее на поверхности (в прямом и переносном смысле) явление — действие света на механические свойства металлов — не было обнаружено раньше? Ответ, на наш взгляд, состоит в следующем. Во-первых, действие света наблюдается лишь в определенном интервале доз облучения, а также в случае превышения некоторого порога по интенсивности. Так, рассеянное естественное освещение обычно не оказывает существенного влияния, как и освещение образца в приборе для измерения микротвердости (хотя известная осторожность при этом необходима). Во-вторых, эффект имеет место не для любых материалов — требуется определенная степень структурного несовершенства (отклонение от равновесного состояния) и не слишком большая толщина фольги. В самом деле, на примерах образцов меди и сплава медь—никель установлено, что после достаточно высокотемпературного отжига, а также для образцов с толщинами более 1 мм, эффект не обнаруживается или становится весьма слабым. В-третьих, изменения микротвердости при облучении светом обычно затухают в течение времени порядка нескольких часов или даже быстрее. И, наконец, нельзя исключить того, что раньше просто не приходило в голову поставить соответствующие эксперименты, или их результатам не придали значения (мы пришли к идее облучения светом только после обнаружения менее экзотического «дальнего действия» — при ионном облучении — и решились сообщить о результатах лишь после многочисленных проверок).

## Метаморфозы на границах

До сих пор речь шла об изменении дефектной структуры на больших расстояниях, приводящем к изменению механических свойств — микротвердости. Однако оказалось, что происходит еще и аномальная миграция примесей, а также перераспределение основных компонентов сплава с обеих сторон фольги (сегрегация).

Явление сегрегации в физике твердого тела хорошо известно. Оно заключается в неоднородном распределении компонентов сплава (или примесей), обнаруживаемом вблизи поверхностей и границ раздела фаз, и объясняется с термодинамической точки зрения. Основным параметром в термодинамике поверхностей раздела — свободная энергия. Фундаментальная зависимость между свободной энергией поверхности и ее химическим состоянием была установлена Гиббсом. Другая термодинамическая характеристика состояния — химический потенциал компонентов — применяется для описания многокомпонентных систем. Вариации химического потенциала, имеющие место при структурно-фазовых превращениях, приводят к диффузионному перераспределению компонентов системы вблизи внешних и внутренних границ раздела, что обеспечивает выравнивание химического потенциала. Если система в начальном состоянии неравновесна, а по истечении определенного времени переходит к равновесному состоянию, то сегрегации, соответствующие неравновесному состоянию, рассасываются, и возникают новые (равновесные) сегрегации. Естественно, четко разделить равновесные и неравновесные сегрегации невозможно.

Известно, что в связи со стремлением твердых тел к понижению свободной поверхностной энергии поверхность может обогащаться каким-то элементом или группой химически связанных атомов (кластеров). Структурно-фазовые превращения, вызывающие изменения химического потенциала компонентов и его распределения в пространстве, заставляют компоненты перераспределяться, приводя, в частности, к их поверхностной сегрегации, соответствующей минимуму поверхностной энергии для нового состояния. Учитывая эффект дальнего действия, не стоило бы удивляться, если бы в результате облучения произошло перераспределение основных компонентов как с облучаемой, так и с необлучаемой (обратной) сторон фольги.

Исходя из этих предпосылок, проводилось сравнительное исследование распределения компонентов в поверхностных слоях прокатанных образцов фольги сплава пермаллой-79 и медно-никелевого сплава до и после облучения ионами бора в зависимости от энергии ионов и плотности ионного тока. Получилась поразительная картина [12]. Изменяется не только концентрация

основных компонентов сплавов с обеих сторон фольги: имплантируемый элемент (бор) появляется на обратной стороне. Причем при энергии ионов, превышающей пороговую для микротвердости (30 кэВ), происходит сравнительно резкое уменьшение содержания никеля на обратной стороне и менее выраженное уменьшение на облучаемой стороне. На рис.6 представлена зависимость концентрации атомов бора в поверхностных слоях образцов с лицевой и «обратной» сторон от энергии ионов. Она коррелирует с зависимостью изменения содержания основных компонентов.

Характерно, что на обратной стороне примесь (бор) концентрируется в тонком приповерхностном слое. В то же время на облучаемой стороне профиль бора не соответствует теоретическому распределению при его имплантации, а смещен в сторону поверхности. Следовательно, наблюдается четко выраженная поверхностная сегрегация компонентов на обеих сторонах фольги.

Явление сегрегации и аномального переноса примеси при ионном облучении было обнаружено не только в области малых доз, но и при гораздо больших дозах. На рис.7 представлены результаты анализа состава поверхностных слоев фольги Cu-Ni с обратной стороны после имплантации ионов бора с дозой  $1 \cdot 10^{17}$  см<sup>-2</sup> при разной плотности ионного тока (скорости набора дозы). Когда скорость набора дозы увеличивается, наблюдается немонотонное повышение содержания бора в приповерхностных слоях; при плотности тока, равной 40 мкА/см<sup>2</sup>, происходит его резкий подъем. Соответственно этой зависимости уменьшается значение микротвердости облученных образцов.

Итак, при ионном облучении наблюдается сквозное проникновение атомов бора и их «скоп-

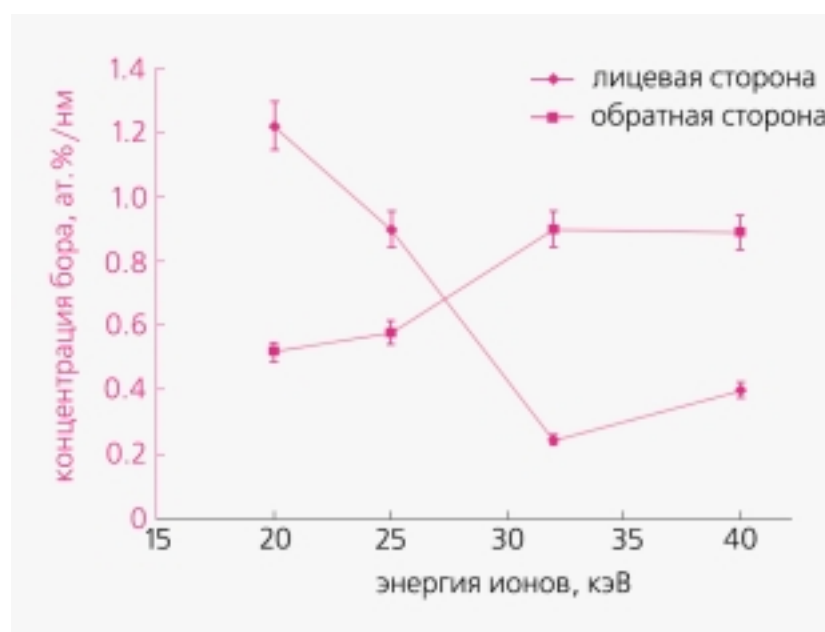


Рис. 6. Зависимость средней концентрации бора в приповерхностном слое толщиной 10 нм с лицевой и обратной сторон фольги сплава пермаллой-79 от энергии имплантируемых ионов.



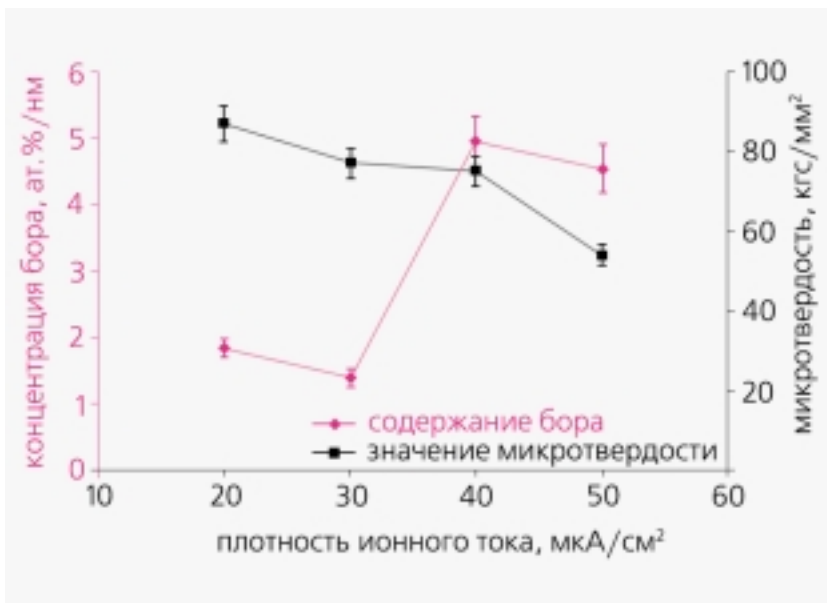


Рис.7. Зависимости микротвердости и средней концентрации бора в приповерхностном слое толщиной 20 нм с обратной стороны фольги Cu-Ni от плотности ионного тока.

ление» вблизи обеих поверхностей фольги. Чем вызвано такое проникновение? Конденсация бора из газовой фазы ( $\text{BF}_3$ ) на обратной стороне маловероятна (для части образцов эта сторона покрывалась химически стойким лаком). Следовательно, происходит аномальная миграция бора через всю толщу фольги, а затем его накопление в поверхностных слоях ее обратной стороны; сегрегация связана с высокой поверхностной активностью бора.

Можно было предположить, что одним из факторов, влияющим на диффузию примеси во время имплантации большими дозами, служит рост температуры образцов при увеличении плотности ионного тока (в частности, до  $\sim 500$  К при  $50$  мкА/см<sup>2</sup>). Однако, в соответствии с результатами экстраполяции табличной зависимости, коэффициент диффузии бора в метастабильных неупорядоченных сплавах металл-бор составляет  $5 \cdot 10^{-23}$  м<sup>2</sup>/с, а по нашим оценкам из данных эксперимента по имплантации ионов бора в сплав Fe-Cr при аналогичных параметрах —  $3 \cdot 10^{-19}$  м<sup>2</sup>/с. Эти значения коэффициентов явно недостаточны для термостимулированной диффузии до обратной стороны фольги во время облучения. (Требуемые коэффициенты диффузии могут быть оценены из простых расчетов. В опытах, результаты которых приведены на рис.6, они должны превышать величину  $d^2/t \approx 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с, где  $d$  — толщина фольги,  $t$  — среднее время облучения.) Но, может быть, миграция атомов примеси происходит после облучения (анализ химического состава проводился через 2–3 месяца)? Хотя окончательно исключить такой вариант нельзя, он тоже представляется маловероятным: оценки показывают, что и в этом случае требуются по крайней мере на четыре порядка более высокие значения коэффициента

диффузии бора, чем полученные из литературных данных путем экстраполяции.

Скорее всего, примесь мигрирует преимущественно по системе протяженных линейных и планарных дефектов (границам зерен, дислокациям) во время облучения, а стимулирующим фактором для миграции становится неравновесное состояние прокатанной фольги, в которой плотность дефектов весьма велика. Под влиянием тех процессов, которые обсуждались выше в связи с малодозным эффектом дальнего действия, области протяженных дефектов переходят в сильно возбужденное состояние, при котором частота перекоков атомов (коэффициент диффузии) резко возрастает. Сквозное проникновение имплантированной примеси и сегрегация наблюдались и при облучении сплава пермаллоя-79 ионами фосфора. Наблюдаемые закономерности свидетельствуют о взаимосвязи дальнедействующих структурных изменений и перераспределений компонентов, а также аномального переноса имплантируемой примеси.

Все эти факты указывают: взаимодействие даже относительно слабых, не вызывающих существенного повышения температуры потоков энергии с твердыми телами, находящимися в состоянии, далеко от равновесия, может сопровождаться процессами, которые влияют на структуру, состав и свойства. Причем изменения возникают в слоях, далеко отстоящих от области непосредственного поглощения энергии.

\* \* \*

Пытаясь дать представление о весьма интересном, на наш взгляд, явлении, которое мы изучаем на протяжении ряда лет, авторы хотели вызвать к нему интерес научной общественности. К этому побуждает, в частности, скептическое отношение, с которым зачастую приходится сталкиваться в дискуссиях. Почва для такого скепсиса существует, так как в эффекте дальнего действия много странного, и пока отсутствует сколько-нибудь законченная теория. На наш взгляд, однако, это не дает оснований отрицать существование эффекта. В этом убеждает многократная проверка результатов, хорошая повторяемость и регулярность наблюдаемых зависимостей от различных факторов.

Мы почти не касались прикладных аспектов, но убеждены, что такие аспекты существуют. Ионная имплантация широко применяется в различных областях техники. Однако она используется преимущественно там, где нужно изменить свойства только тонких приповерхностных слоев. Переход к модификации свойств более толстых слоев с точки зрения традиционного подхода требует создания установок на энергии ионов порядка мегаэлектронвольт, весьма дорогих и громоздких. Эффект дальнего действия открывает перспективы модификации свойств на большие глубины с помощью обычных установок ионной имплантации

(рассчитанных на энергии порядка десятков килоэлектронвольт), которые выпускаются серийно и входят в оснащение многих предприятий, научных учреждений и университетов. Еще более заманчивы возможности использования световых пучков — в этом случае вообще не требуется сложного дорогостоящего оборудования. Не менее интересна и научная сторона эффекта, о которой говорилось выше: возможно развитие новых представлений в области физики твердого тела и физики взаимодействия слабых энергетических потоков с веществом.

Поэтому эффект дальнего действия заслуживает разносторонних исследований с привлечением современных методов (электронной микроскопии, рентгеновской дифракции, эффекта Мёссбауэра и др.), а также глубокой теоретической проработки. ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 02-02-16670) и Министерства науки и образования РФ (Научная программа «Университеты России» УР.02.01.012).

## Литература

1. Успенская Г.И., Абрамова Н.Н., Тетельбаум Д.И. и др. // Физические основы ионно-лучевого легирования. Ч.1. Горький, 1972. С.96—99.
2. Павлов П.В., Пашков В.И., Генкин В.М. и др. // ФТТ. 1973. Т.15. С.2857—2859.
3. Павлов П.В., Семин Ю.А., Скупов В.Д. и др. // ФТП. 1986. Т.20. С.503—507.
4. Tetelbaum D.I., Kuril'chik E.V., Latisheva N.D. // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. 1997. B127/128. P.153—156.
5. Tetelbaum D.I., Azov A.Yu., Kuril'chik E.V. et al. // Vacuum. 2003. V.70. №2—3. P.169—173.
6. Тетельбаум Д.И., Трофимов А.А., Азов А.Ю. и др. // Письма в ЖТФ. 1998. Т.24. Вып.23. С.9—13.
7. Тетельбаум Д.И., Азов А.Ю., Голяков П.И. // Письма в ЖТФ. 2003. Т.29. Вып.2. С.35—41.
8. Тетельбаум Д.И., Курильчик Е.В., Азов А.Ю. и др. // Поверхность. 2003. №4. С.67—69.
9. Тетельбаум Д.И., Менделева Ю.А., Азов А.Ю. // Письма в ЖТФ. 2004. Т.30. Вып.11. С.65—71.
10. Козьма А.А., Малыхин С.В., Соболев О.В. и др. // Физика металлов и металловедение. 1991. Т.7. С.168—175.
11. Лущик Ч.Б., Лущик А.Ч. Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах. М., 1989.
12. Баянкин В.Я., Гусева М.И., Тетельбаум Д.И., Гильмутдинов Ф.З. // Поверхность. 2005. (Принято в печать).

В 2004 г. в Бонне состоялась первая межправительственная (с участием 154 государств) конференция по использованию возобновляемых источников энергии. О своих амбициозных планах в этой области заявили такие развивающиеся страны, как Китай, Марокко, Филиппины. В частности, КНР планирует к 2010 г. обеспечить за счет источников без вредных, загрязняющих среду выбросов 10% потребностей страны. Больших успехов в возобновляемой энергетике достигли Дания и Испания. Лидирующее место в мире по ветровым электростанциям занимает Германия, а по солнечным — Япония.

Terre Sauvage. 2004. №197. P.50 (Франция).

22 марта 2004 г. благодаря американо-европейскому спутнику «СОНО» была открыта 750-я по счету комета (аппарат вышел на орбиту в декабре 1995 г.). Это достижение принадлежит германскому астроному-любителю С.Хёнигу (S.Hönl), который и ранее числился в рядах наиболее успешных «охотников» за подобными небесными телами. Новый объект относится к семейству комет, «царапающих» Солнце: они подходят близко к светилу и там начинают быстро испаряться.

Ждет ли такая участь комету Хёнига, вскоре будет ясно.

Astronomy and Geophysics. 2004. V.45. №3. P.3, 28 (Великобритания);

Одно из самых тяжелых климатических событий в истории

США — жесточайшая засуха, произошедшая в 30-х годах прошлого века. Она привела к разорению фермеров, усугубив экономический кризис, который переживала тогда страна. Недавно специалисты НАСА занялись поиском причины этого бедствия. Воссоздав на математической модели климатические условия того времени, они выяснили, что поверхностные воды южной части Тихого океана были тогда значительно холоднее нормы, а южной акватории Атлантического — теплее. Эти отклонения привели к ослаблению ветров, которые регулярно дуют из Мексиканского залива на Великие равнины, принося туда влагу.

Terre Sauvage. 2004. №194. P.50 (Франция).

Зерошка