

01

Исследование методом молекулярной динамики обратимой релаксации сжимающих механических напряжений в поликристаллических пленках металлов после остановки их осаждения

© А.С. Бабушкин, А.Н. Куприянов

Ярославский филиал Физико-технологического института им. К.А. Валиева РАН,
150007 Ярославль, Россия
e-mail: artem.yf-ftian@mail.ru

Поступило в Редакцию 12 апреля 2023 г.

В окончательной редакции 23 августа 2023 г.

Принято к публикации 24 августа 2023 г.

Приведены результаты моделирования осаждения поликристаллических пленок металлов методом молекулярной динамики. На примере Cr и Cu исследовано влияние энергии осаждаемых частиц, скорости осаждения, а также материала и температуры пленки на изменение напряжений при остановке и возобновлении осаждения. Результаты моделирования показали, что обратимая релаксация сжимающих напряжений в поликристаллических пленках при остановке осаждения связана с латеральным перемещением атомов, попавших в межзеренные границы с поверхности в ходе осаждения, что привело к более компактному их расположению. Процесс одинаково протекает во всех слоях пленки как после остановки осаждения, так и во время него. Выход атомов из межзеренных границ обратно на поверхность пленки при остановке осаждения не наблюдался.

Ключевые слова: остаточные механические напряжения, рост поликристаллических пленок, хром, медь, молекулярная динамика.

DOI: 10.61011/JTF.2023.10.56274.92-23

Введение

Тонкие поликристаллические пленки металлов широко применяются в микро- и нанoeлектромеханических системах [1,2], оптике [3] и устройствах хранения информации [4]. Остаточные механические напряжения, возникающие при осаждении, ограничивают возможность их использования, так как могут приводить к растрескиванию и отслаиванию [5,6], вздутию пленки [6,7], а также деформации элементов конструкции [8]. С другой стороны, управляемая деформация, вызванная остаточными напряжениями, может быть использована для самосборки трехмерных МЭМС-устройств [9–12].

Для прогнозирования и контроля напряжений необходимо понимание механизмов их формирования в ходе осаждения пленок.

Большинство металлических пленок растут по механизму Вольмера-Вебера [13], в ходе которого выделяют три стадии формирования напряжений. На начальном этапе на подложке образуются отдельные островки, обладающие сжимающими напряжениями. Эти напряжения связывают с лапласовым давлением [14], а также влиянием поверхностных дефектов [15]. На втором этапе островки начинают соприкасаться и образовывать межзеренную границу, что приводит к уменьшению поверхностной энергии [16–18]. В результате в пленке возникают растягивающие напряжения. На третьем этапе при низкой подвижности адатомов пленка продол-

жает накапливать растягивающие напряжения. Если же подвижность адатомов будет высокой, то растягивающие напряжения станут снижаться и постепенно произойдет переход к сжимающим напряжениям [19,20]. Величина подвижности адатомов зависит как от материала, так и условий осаждения, например, температуры подложки и энергии осаждаемых атомов. При остановке осаждения часть этих сжимающих напряжений релаксирует, а если осаждение возобновить, то напряжения возвращаются к прежнему значению и развиваются так, как если бы перерыва не было [20,21]. Механизм возникновения сжимающих напряжений на этом этапе и их частичной релаксации при остановке осаждения до сих пор обсуждается [22–24]. В качестве причин называют проникновение адатомов в межзеренную границу и их выход обратно на поверхность [17], попадание адатомов между коалесцирующими атомными ступенями и их обратный выход [25], наследование сжимающих напряжений от первой стадии роста пленки и рекристаллизацию, которая приводит к изменению плотности межзеренных границ [26].

Наиболее обобщенная кинетическая модель, описывающая формирование напряжений в ходе осаждения поликристаллических пленок, представлена в работах [27,28]. Эта модель напрямую связывает величину напряжений с параметрами осаждения и микроструктурой и, как следствие, хорошо объясняет наблюдаемые в экспериментах зависимости напряжений от скорости

осаждения, температуры и материала пленок. Возникновение растягивающих напряжений авторы связывают с образованием межзеренной границы и снижением поверхностной энергии, а возникновение сжимающих напряжений объясняют проникновением адатомов в межзеренные границы. Причину последнего они видят в увеличении химического потенциала на поверхности ($\delta\mu_s$) зерен из-за того, что при осаждении она приходит в неравновесное состояние. Возникающая разница химических потенциалов на поверхности и в межзеренной границе $\Delta\mu$ становится движущей силой для адатомов. Она равна $\delta\mu_s + \sigma_i\Omega$, где σ_i — напряжения в приповерхностном атомном слое, Ω — объем, приходящийся на один атом. Знак плюс обусловлен тем, что сжимающие напряжения принято считать отрицательными. В ходе осаждения $\Delta\mu$ положительна, в результате чего происходит движение адатомов с поверхности в межзеренную границу и формирование сжимающих напряжений. Формирование нового участка межзеренной границы приводит к возникновению растягивающих напряжений в новом атомном слое, после чего внедрение в нее адатомов приводит к постепенному снижению растягивающих и переходу к сжимающим напряжениям. Такая последовательность процессов повторяется в каждом новом атомном слое i , формируя в нем напряжения σ_i :

$$\sigma_i = \sigma_C + (\sigma_T - \sigma_C) \exp\left(-\frac{\Delta t_i}{\tau}\right), \quad (1)$$

где σ_T — растягивающие напряжения, возникающие при формировании нового участка межзеренной границы в i -м слое, σ_C — максимальные сжимающие напряжения, которые могут в нем возникнуть в результате внедрения адатомов в межзеренную границу, Δt_i — время формирования слоя, а τ — кинетический параметр, зависящий от размера зерен L , параметра решетки a и эффективного коэффициента диффузии D :

$$\tau = \frac{La}{\beta D}. \quad (2)$$

Константа β — определяется следующим образом:

$$\beta = \frac{4C_s M_f \Omega}{kT}, \quad (3)$$

где Ω — объем, приходящийся на один атом, M_f — двухосный модуль, C_s — отношение числа подвижных атомов к числу мест на террасе, прилегающей к межзеренной границе, k — постоянная Больцмана, T — температура.

В итоге средние напряжения в пленке толщиной h , имеющей N заполненных атомных слоев, равны

$$\langle \sigma \rangle = \frac{a}{h} \sum_i \left[\sigma_C + (\sigma_T - \sigma_C) \exp\left(-\frac{\Delta t_i}{\tau}\right) \right]. \quad (4)$$

Как полагают авторы кинетической модели, при остановке осаждения химический потенциал на поверхности

возвращается к равновесному значению, добавка $\delta\mu_s$ исчезает, и при наличии сжимающих напряжений $\Delta\mu$ становится отрицательной, в результате чего часть атомов возвращается обратно на поверхность [24].

Для того чтобы изучить, какие процессы приводят к формированию и релаксации напряжений в пленке, необходима возможность наблюдения поведения отдельных атомов в ходе осаждения пленки и после остановки осаждения. К сожалению, возможности существующих экспериментальных методов исследования пленок *in-situ* весьма ограничены. Однако современные методы компьютерного моделирования, в частности метод молекулярной динамики (МД), открывают все большие возможности для исследования процессов, происходящих на атомарном уровне. Моделирование осуществляется путем решения уравнений движения для получения положений всех атомов в модели как функций времени. Силы, действующие на каждый атом, определяются потенциалом межатомного взаимодействия, заданным пользователем. Моделированию осаждения металлических пленок методом молекулярной динамики посвящено множество работ, однако лишь в малой их части рассматриваются поликристаллические пленки. В работах [29,30] продемонстрировано проникновение адатомов в межзеренную границу при осаждении пленок Ni, в которых в результате формировались сжимающие напряжения. В работе [31] представлены результаты обширного исследования зависимости процесса формирования напряжений во время роста поликристаллических пленок Fe и W от таких параметров, как форма, размер, ориентация исходных островков и энергия осаждаемых атомов. Изменение напряжений в ходе осаждения в их работе согласуются с кинетической моделью. Однако в ходе моделирования процесса релаксации сжимающих напряжений при остановке осаждения, выход атомов из межзеренной границы обратно на поверхность обнаружен не был, но было замечено, что ширина межзеренной границы в приповерхностной области после прекращения осаждения уменьшается. В нашей работе, посвященной моделированию осаждения поликристаллических пленок Cr [32], нами была исследована зависимость шероховатости поверхности и механических напряжений от энергии осаждаемых атомов и скорости осаждения. Чем выше была энергия атомов и ниже скорость осаждения, тем больше атомов было способно спускаться по атомным ступеням, достраивать их и проникать в межзеренную границу. В результате пленки, осажденные с большими энергиями, имели более ровную поверхность и большие сжимающие напряжения. Снижение скорости осаждения также привело к увеличению сжимающих напряжений, но шероховатость поверхности практически не изменилась. Данные результаты хорошо согласуются с кинетической моделью. Однако исследование остановки осаждения показало, что частичная релаксация сжимающих напряжений связана не с выходом атомов обратно на поверхность, а с их перераспределением

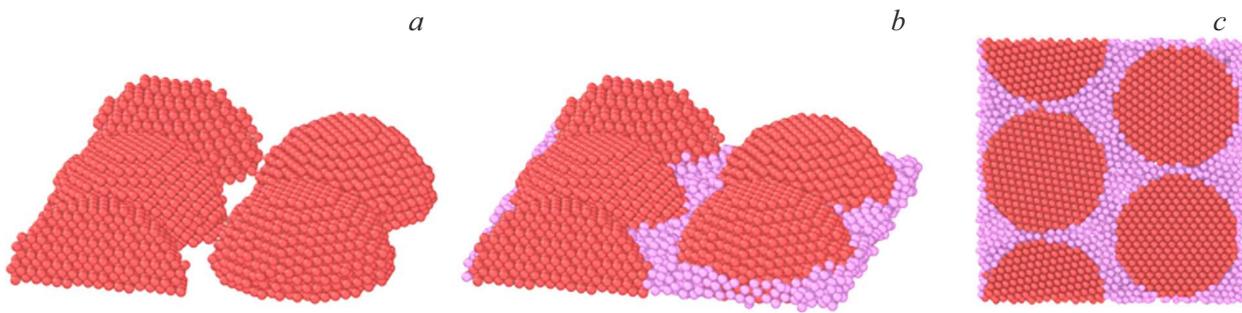


Рис. 1. Изображение модели до начала осаждения: полусферические островки до (а) и после (б) формирования исходного тонкого слоя межзеренной границы, а также вид снизу (с).

в межзеренной границе в латеральном направлении. Таким образом, несмотря на то, что представленные в кинетической модели механизмы формирования напряжений в ходе осаждения пленок хорошо согласуются с результатами экспериментов и МД моделирований, ее описание релаксации сжимающих напряжений после остановки осаждения с результатами МД моделирований не согласуется.

Целью настоящей работы является исследование методом молекулярной динамики изменения напряжений при остановке и возобновлении осаждения поликристаллических пленок выяснить, что именно обуславливает эффект обратимой релаксации сжимающих напряжений, изучить влияние энергии осаждаемых частиц, скорости осаждения, а также температуры и материала пленки.

1. Описание модели

Моделирование было проведено с использованием свободно распространяемого программного пакета для решения задач молекулярной динамики LAMMPS [33]. Визуализация данных осуществлялась с помощью открытого программного обеспечения для анализа моделей на основе частиц OVITO [34]. Для расчетов взаимодействия между атомами Си использовалась модель погруженного атома [35], а между атомами Сг — модифицированная модель погруженного атома [36]. Шаг моделирования был равен 1 fs. Для имитации поликристаллической пленки Сг, находящейся на начальном этапе роста, были сформированы полусферические островки с ориентацией (110) (такой текстурой обладали пленки Сг, осажденные магнетронным методом, в наших экспериментальных работах [37,38]) и радиусом 2 nm (рис. 1, а), пространство между которыми было заполнено тонким слоем аморфной фазы (рис. 1, б). Пленки Си изготавливались аналогично, но с ориентацией (111), так как пленкам металлов с ГЦК решеткой такая текстура наиболее свойственна [39]. Более подробно данный подход к моделированию осаждения поликристаллических пленок описан в работе [31]. Три из четырех кристаллитов были повернуты относительно оси симметрии полусферы на углы -45° , 45° и 90°

(рис. 1, с), в результате чего при осаждении зерна не срастались в единый монокристалл, а формировалась разупорядоченная межзеренная граница. Нижний слой атомов в полусферах был зафиксирован. Пространство между зернами на высоте четырех атомных слоев было заполнено атомами случайным образом. Плотность заполнения этих четырех слоев определяла значение исходных напряжений в пленке [31]. Нижний слой этой группы атомов также был зафиксирован, но только по оси Z, в результате чего после проведения процедуры минимизации свободной энергии они перестраивались, формируя начало межзеренной границы. На боковых гранях области моделирования были заданы периодические граничные условия. Перед проведением осаждения во всей модели задавалась температура, равная 300 К, и производилась процедура релаксации. При проведении осаждения в трех атомных слоях над фиксированным слоем был задан термостат 300 К.

Бросание атомов осуществлялось каждые 500 fs на высоте 8 nm от образца. Горизонтальные координаты точки появления атома определялись случайно. У осаждаемых атомов задавалась начальная скорость, соответствующая требуемой кинетической энергии и направленная вертикально вниз.

Компоненты тензора напряжений определялись через кинетическую энергию и вириал [40]:

$$\sigma_{ij} = - \left(\frac{\sum_k^N m_k v_{ki} v_{kj}}{V} + \frac{\sum_k^{N'} r_{ki} f_{kj}}{V} \right), \quad (5)$$

где i и j принимают значения x , y и z ; m — масса атома, V — объем, который занимают N атомов, v_{ki} и v_{kj} — компоненты скорости k -го атома, r_{ki} и f_{kj} — компоненты радиус-вектора и силы, действующей на k -й атом соответственно. Так как пленка свободна в вертикальном направлении, компонента напряжений σ_{zz} равна нулю. Горизонтальные компоненты напряжений в изотропных пленках равны, однако в каждый момент из-за флуктуаций в модели они могли немного различаться,

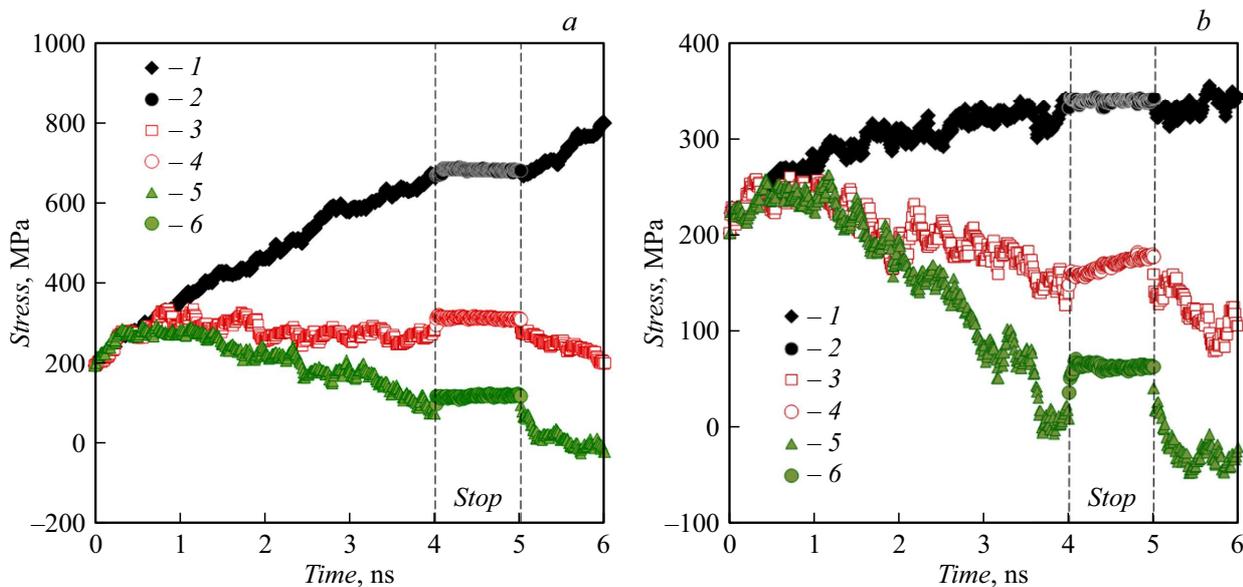


Рис. 2. Изменение механических напряжений в ходе осаждения пленок Cr (a) и Cu (b) с энергиями падающих частиц 3 (1), 10 (3) и 15 eV (5) при 300 К, а также остановки (2, 4, 6) и возобновления (1, 3, 5) осаждения.

поэтому проводилось усреднение, и итоговое значение напряжений определялось как $(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})/2$.

2. Результаты и обсуждение

На рис. 2 представлено изменение механических напряжений в ходе осаждения пленок Cr (a) и Cu (b) с энергиями падающих частиц 3, 10 и 15 eV в течение 4 ns, а также во время остановки осаждения в течение 1 ns и возобновления в течение 1 ns. Как можно заметить, на всех графиках во время осаждения присутствуют некоторые осцилляции. На первый взгляд может показаться, что это просто зашумленность, но это не так. Каждое значение на графике является результатом усреднения 100 измерений, проводимых на каждом из 100 шагов. Данные колебания вполне согласуются с кинетической моделью. Когда возникает новый атомный слой и появляется новый участок межзеренной границы, он тут же вносит добавку растягивающих напряжений. Далее растягивающие напряжения в этом слое постепенно снижаются и могут перейти в сжимающие. В результате на графике средних напряжений мы видим колебания, так как модель небольшая (рис. 3) (за 4 ns к исходным 4 завершенным атомным слоям добавляется еще 8), и вклад каждого нового слоя в общие напряжения достаточно ощутим.

При одних и тех же условиях осаждения графики изменения напряжений в пленках Cu смещены в сторону сжимающих напряжений по сравнению с таковыми для Cr. Это обусловлено тем, что атомы Cu обладают большей подвижностью, а следовательно, при осаждении больше атомов способно проникать с поверхности в межзеренную границу. Аналогично влияет величина

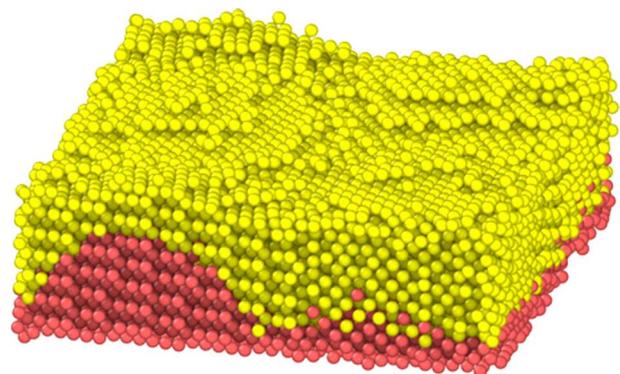


Рис. 3. Изображение модели пленки Cr после осаждения в течение 4 ns с энергией 15 eV и периодом осаждения 500 fs.

энергии осаждаемых частиц. При энергии падающих частиц 3 eV атомы на поверхности обладают малой подвижностью, поэтому лишь небольшая их часть способна достичь края зерна и проникнуть в межзеренную границу, и в результате в пленках развиваются преимущественно растягивающие напряжения. При больших энергиях атомы на поверхности обладают большей подвижностью, следствием чего является постепенный переход от растягивающих напряжений к сжимающим в ходе осаждения.

Это же отражается и на величине изменения напряжений при остановке осаждения. Ранее при моделировании осаждения пленок Cr нами было показано, что это изменение обусловлено перераспределением атомов внутри межзеренной границы [41]. Чем выше подвижность атомов, тем их больше проникает в межзеренную границу и тем больший эффект оказывает

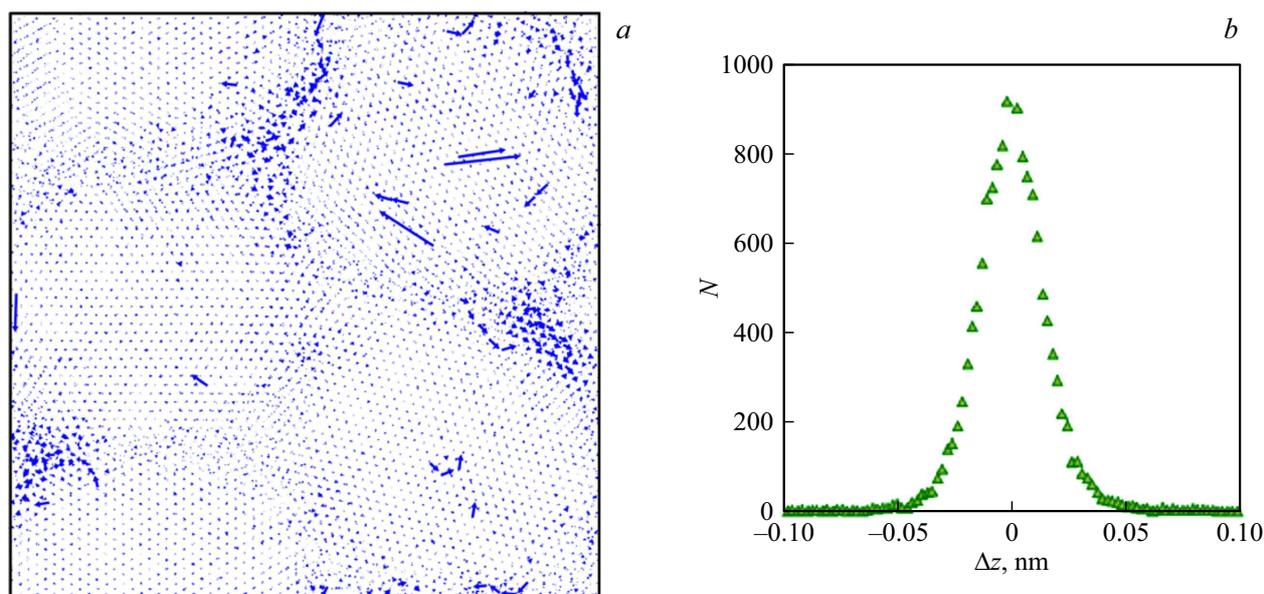


Рис. 4. Векторы смещения атомов Cu в течение 1 ns после остановки осаждения пленки с энергией падающих частиц 15 eV в течение 4 ns (a), распределение вертикальных компонент этих векторов (b).

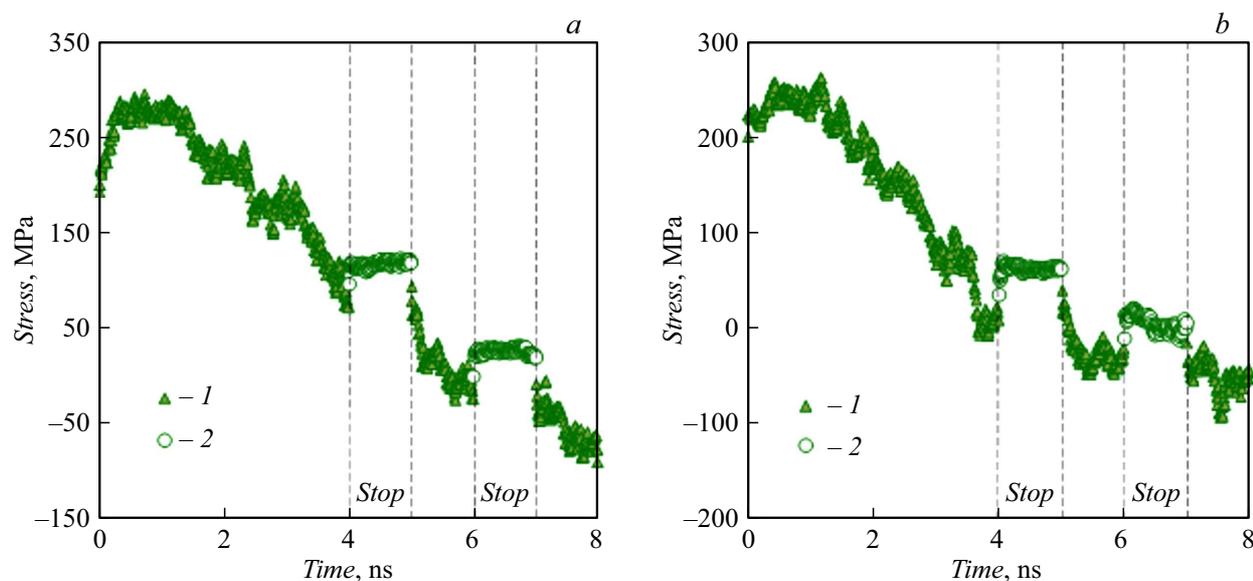


Рис. 5. Изменение механических напряжений в пленках Cr (a) и Cu (b) во время осаждения с энергией 15 eV (1) и двух последовательных остановок осаждения (2).

перестройка. Поэтому изменение напряжений после остановки осаждения в пленках Cu больше, чем в пленках Cr, а также оно растет с увеличением энергии осаждаемых атомов. При этом выхода атомов на поверхность, как и в прошлой работе, не наблюдалось. На рис. 4 представлены векторы смещений атомов Cu после остановки осаждения (вид сверху) с энергией падающих частиц 15 eV на 1 ns (a), а также график распределения их вертикальных компонент (b). Можно видеть, что перераспределение атомов происходит в межзеренной границе. На месте зерен смещения столь

малы (кроме нескольких атомов на поверхности), что стрелки выродились в точки. График распределения вертикальных компонент векторов смещений показывает, что направленное движение атомов по вертикали отсутствует.

На рис. 5 можно видеть результат двух последовательных остановок осаждения пленок Cr (a) и Cu (b). Величины изменения напряжений во время первой и второй остановки практически одинаковы. Это говорит о том, что процесс перестройки атомов не зависит от напряжений в нижележащих слоях, так как в ходе пер-

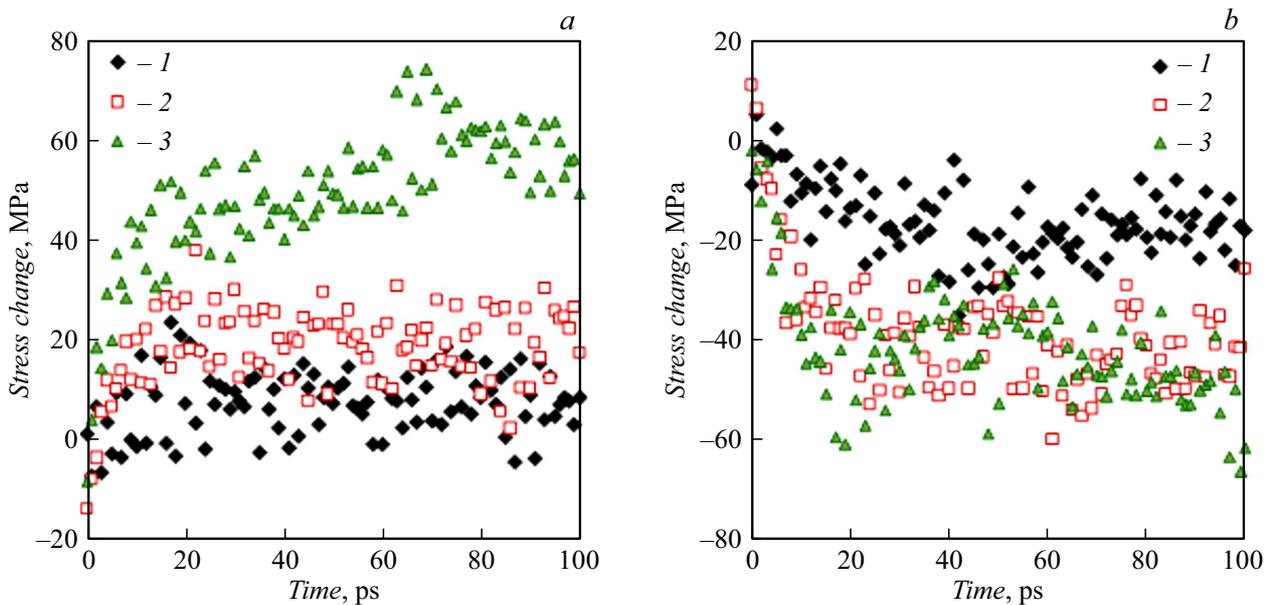


Рис. 6. Изменение механических напряжений в первые 100 ps после остановки (*a*) и возобновления (*b*) осаждения пленок Cu с энергиями падающих частиц 3 (*1*), 10 (*2*) и 15 eV (*3*) при 300 K.

вой и второй остановки осаждения средние напряжения в пленках различались как величиной, так и знаком.

На рис. 6 представлены графики изменения напряжений в пленках Cu, осажденных с энергиями падающих частиц 3, 10 и 15 eV в первые 100 ps после остановки осаждения, проводившегося в течение 4 ns (*a*), и в первые 100 ps после его возобновления (*b*). Данные графики приведены для более подробного рассмотрения результатов остановки и возобновления осаждений, представленных на рис. 2, *b*. Каждое значение на этих графиках является результатом усреднения 1000 измерений, проводимых на каждом шаге. Чем выше энергия осаждаемых атомов, тем больше изменение напряжений при остановке и возобновлении осаждения. Как упоминалось ранее, это, вероятно, обусловлено тем, что при большей подвижности на поверхности больше адатомов проникает в межзеренную границу. Чем их больше в ограниченном пространстве, тем сильнее они стремятся перераспределиться более компактно. Так же на рис. 5, а можно заметить, что время релаксации для всех энергий примерно одинаковое. По всей видимости, это обусловлено тем, что по пути с поверхности в межзеренную границу адатомы теряют свою энергию и уже в межзеренной границе их подвижность не отличается от таковой у окружающих атомов.

Быстрый возврат исходного напряженного состояния после возобновления осаждения, вероятно, обусловлен временным усилением потока адатомов с поверхности в межзеренную границу, вызванный тем, что разность химических потенциалов между ними за время остановки выросла из-за частичной релаксации сжимающих напряжений.

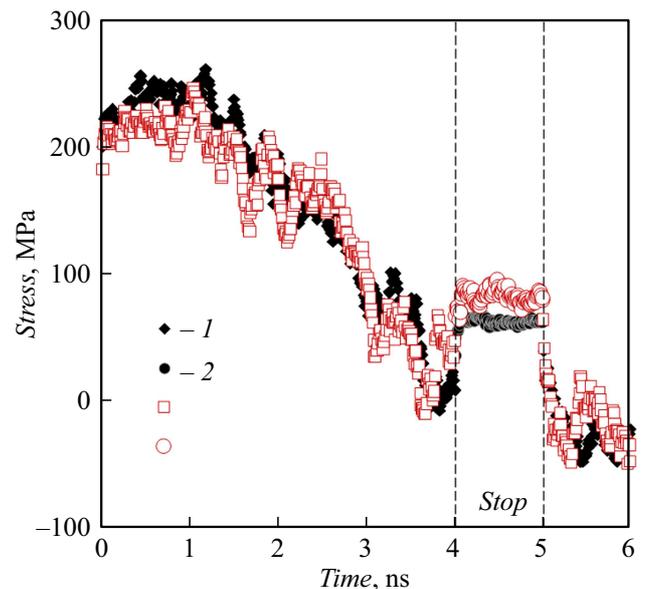


Рис. 7. Изменение механических напряжений в ходе осаждения пленок Cu с энергией падающих частиц 15 eV при температурах 300 (*1*) и 500 K (*3*), а также остановки (*2*, *4*) и возобновления (*1*, *3*) осаждения.

На рис. 7 представлено изменение механических напряжений в ходе осаждения пленок Cu с энергией падающих частиц 15 eV при температурах 300 и 500 K, а также в ходе остановки и возобновления осаждения. Изменения напряжений после остановки и возобновления осаждения более подробно изображены на рис. 8. В целом графики изменения напряжений при осаждении достаточно близки. На первый взгляд может показаться,

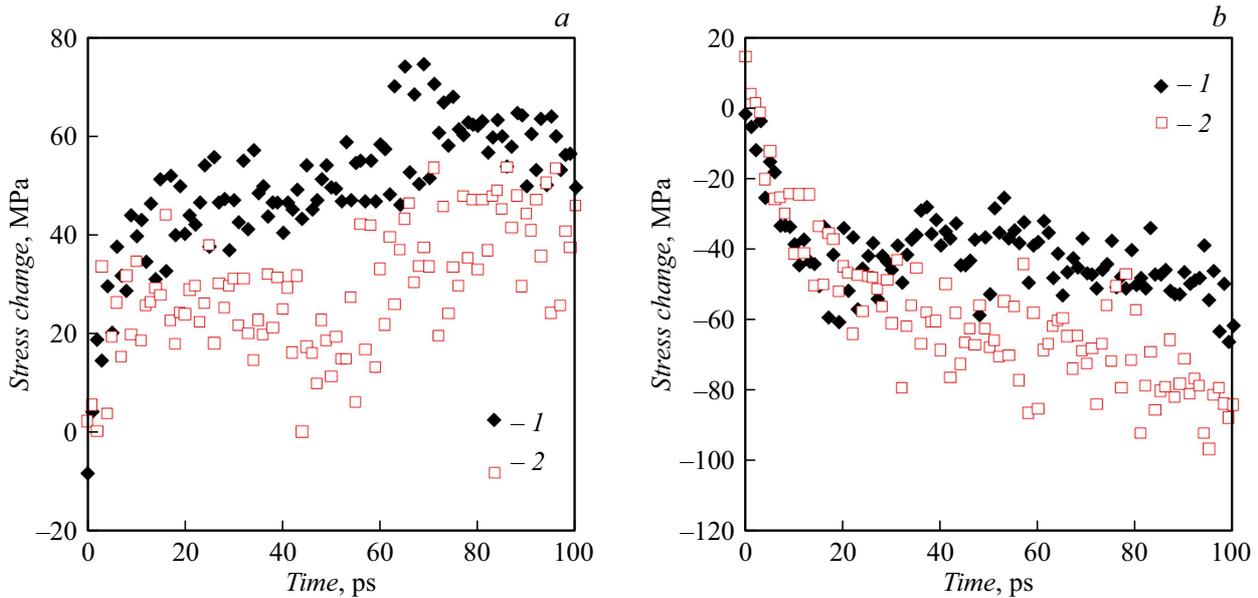


Рис. 8. Изменение механических напряжений в первые 100 ps после остановки (a) и возобновления (b) осаждения пленок Cu с энергией падающих частиц 15 eV при 300 (1) и 500 К (2).

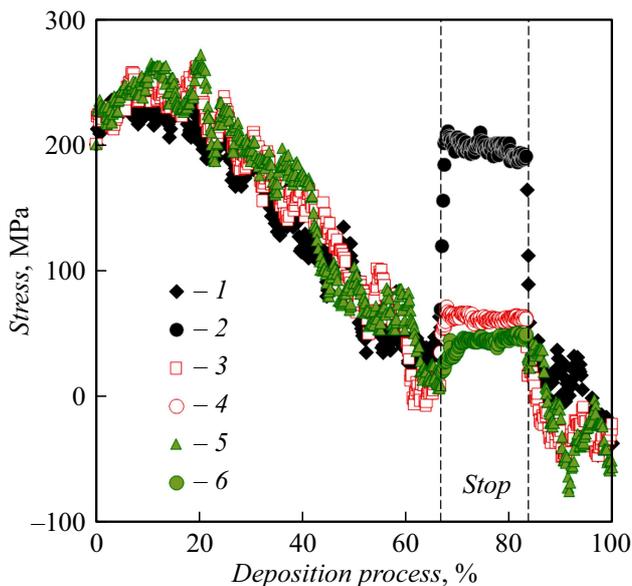


Рис. 9. Изменение механических напряжений в ходе осаждения пленок Cu с энергией падающих частиц 15 eV при 300 К с периодами между бросками атомов 125 (1), 500 (3) и 2000 fs (5), а также остановки (2, 4, 6) и возобновления (1, 3, 5) осаждения.

что релаксация во время остановки при 500 К немного больше, однако именно изменение напряжений на самом деле меньше, чем при 300 К (рис. 8, a).

Это может показаться противоречивым, ведь при большей подвижности в межзеренную границу должно проникать больше атомов, что впоследствии выльется в большую перестройку и эффект на напряжения. Но дело

в том, что перераспределение атомов в межзеренной границе происходит не только после остановки, но и в процессе осаждения. Атомы проникают в межзеренную границу, свободного места становится все меньше и они начинают перестраиваться. Этот процесс происходит во всех слоях в ходе осаждения и то, что мы видим после его остановки — это лишь остаточное явление. При этом скорость релаксации зависит от подвижности атомов в межзеренной границе, а следовательно, от температуры термостата. Так как при 500 К процесс релаксации протекает быстрее, к моменту остановки осаждения успела завершиться большая его часть, чем при 300 К. Поэтому и изменения напряжений после остановки осаждения при 500 К меньше, чем при 300 К.

На рис. 9 представлен результат осаждения пленок Cu с энергией падающих частиц 15 eV при 300 К с периодами между бросками атомов 125, 500 и 2000 fs, а также его остановки и возобновления. Из-за различия временных масштабов для оси абсцисс используются проценты. Изменения напряжений после остановки и возобновления осаждения в первые 10% времени более подробно изображены на рис. 10. Как можно видеть, чем быстрее осаждалась пленка, тем сильнее менялись напряжения после остановки осаждения. Как было упомянуто ранее, процесс перераспределения атомов в межзеренной границе протекает, в том числе и в ходе самого осаждения. Поэтому чем быстрее осаждалась пленка, тем меньшая доля релаксации успевает произойти в ходе осаждения и тем большая ее часть продолжает протекать уже после остановки. В результате, чем выше скорость осаждения, тем больше изменение напряжений после его остановки.

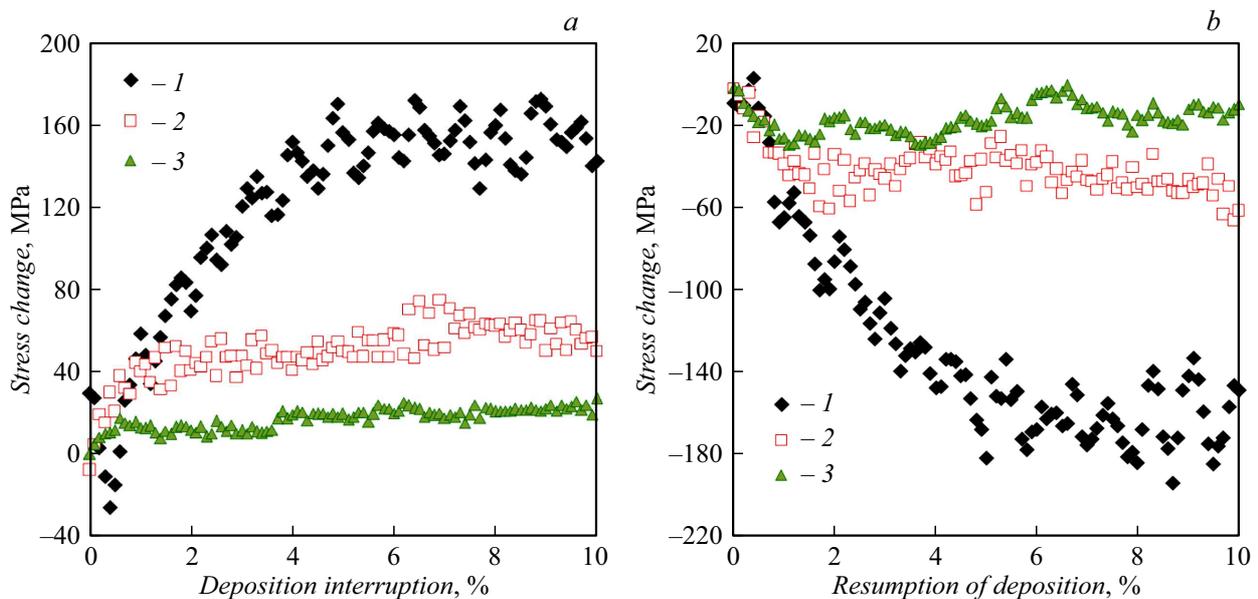


Рис. 10. Изменение механических напряжений в первые 10% времени после остановки (a) и возобновления (b) осаждения пленок Cu с энергией падающих частиц 15 eV при 300 К с периодами между бросками атомов 125 (1), 500 (2) и 2000 fs (3).

Заключение

Результаты МД моделирования показывают, что обратимая релаксация сжимающих напряжений в поликристаллических пленках при остановке осаждения связана с перераспределением атомов внутри межзеренных границ. Атомы перемещаются в латеральном направлении, в результате чего располагаются более компактно. Выход атомов обратно на поверхность пленки при остановке осаждения не наблюдался. Процесс перестройки атомов не зависит от напряжений в нижележащих слоях. Чем выше подвижность атомов на поверхности и скорость осаждения, тем больше изменение напряжений при его остановке.

Финансирование работы

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФТИАН им. К.А. Валиева РАН Минобрнауки РФ по теме FFNN-2022-0017.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] V.K. Varadan, K.J. Vinoy, K.A. Jose. *RF MEMS and Their Applications* (John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK, 2002), DOI: 10.1002/0470856602
- [2] J. Laconte, D. Flandre, J.P. Raskin. *Micromachined thin-film Sensors for SOI-CMOS Co-integration* (Springer Science & Business Media, 2006), DOI: 10.1007/0-387-28843-0
- [3] J.-H. Cho, M.D. Keung, N. Verellen, L. Lagae, V.V. Moshchalkov, P. Van Dorpe, D.H. Gracias. *Small*, **7** (14), 1943 (2011). DOI: 10.1002/sml.201100568
- [4] А.В. Фадеев, К.В. Руденко. *Микроэлектроника*, **50** (5), 347 (2021). DOI: 10.31857/S0544126921050021 [A.V. Fadeev, K.V. Rudenko. *Russ. Microelectron.*, **50**, 311 (2021). DOI: 10.1134/S1063739721050024]
- [5] Z.C. Xia, J.W. Hutchinson. *J. Mech. Phys. Solids*, **48** (6-7), 1107 (2000). DOI: 10.1016/S0022-5096(99)00081-2
- [6] К.А. Валиев, Р.В. Гольдштейн, Ю.В. Житников, Т.М. Махвиладзе, М.Е. Сарычев. *Микроэлектроника*, **38** (6), 404 (2009). DOI: PACS 85.40.Ls [K.A. Valiev, R.V. Goldstein, Y.V. Zhitnikov, T.M. Makhviladze, M.E. Sarychev. *Russ. Microelectron.*, **38**, 364 (2009). DOI: 10.1134/S106373970906002X]
- [7] M.W. Moon, J.W. Chung, K.R. Lee, K.H. Oh, R. Wang, A.G. Evans. *Acta Mater.*, **50** (5), 1219 (2002). DOI: 10.1016/S1359-6454(01)00423-2
- [8] S. Dutta, M. Imran, R. Pal, K.K. Jain, R. Chatterjee. *Microsyst. Technol.*, **17**, 1739 (2011). DOI: 10.1007/s00542-011-1360-5
- [9] D. Karnaushenko, T. Kang, V.K. Bandari, F. Zhu, O.G. Schmidt. *Adv. Mater.*, **32** (15), 1902994 (2020). DOI: 10.1002/adma.201902994
- [10] D.D. Karnaushenko, D. Karnaushenko, D. Makarov, O.G. Schmidt. *NPG Asia Mater.*, **7** (6), e188 (2015). DOI: 10.1038/am.2015.53
- [11] D. Singh, A.T. Kutbee, M.T. Ghoneim, A.M. Hussain, M.M. Hussain. *Adv. Mater. Technol.*, **3** (1), 1700192 (2018). DOI: 10.1002/admt.201700192
- [12] D.-H. Weon, J.-H. Jeon, S. Mohammadi. *J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanom. Struct.*, **25** (1), 264 (2007). DOI: 10.1116/1.2433984
- [13] L.B. Freund, S. Suresh. *Thin film Materials: Stress, Defect Formation and Surface Evolution* (Cambridge University Press, 2004)

- [14] R. Abermann, R. Kramer, J. Mäser. *Thin Solid Films*, **52** (2), 215 (1978). DOI: 10.1016/0040-6090(78)90140-2
- [15] C. Friesen, C.V. Thompson. *Phys. Rev. Lett.*, **89** (12), 126103 (2002). DOI: 10.1103/PhysRevLett.89.126103
- [16] R.W. Hoffman. *Thin Solid Films*, **34** (2), 185 (1976). DOI:10.1016/0040-6090(76)90453-3
- [17] W.D. Nix, B.M. Clemens. *J. Mater. Res.*, **14** (8), 3467 (1999). DOI: 10.1557/JMR.1999.0468
- [18] L.B. Freund, E. Chason. *J. Appl. Phys.*, **89** (9), 4866 (2001). DOI: 10.1063/1.1359437
- [19] G. Abadias, E. Chason, J. Keckes, M. Sebastiani, G.B. Thompson, E. Barthelf, G.L. Doll, C.E. Murray, C.H. Stoessel, L. Martinu. *J. Vacuum Sci. Technol. A: Vacuum, Surfaces, and Films*, **36** (2), 020801 (2018). DOI: 10.1116/1.5011790
- [20] C. Friesen, S.C. Seel, C.V. Thompson. *J. Appl. Phys.*, **95** (3), 1011 (2004). DOI: 10.1063/1.1637728
- [21] J.W. Shin, E. Chason. *Phys. Rev. Lett.*, **103** (5), 056102 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevLett.103.056102
- [22] A.P. Шугуров, A.B. Панин. *ЖТФ*, **90** (12), 1971 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.12.50417.38-20 [A.R. Shugurov, A.V. Panin. *Tech. Phys.*, **65**, 1881 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220120257]
- [23] A. Jamnig, N. Pliatsikas, K. Sarakinos, G. Abadias. *J. Appl. Phys.*, **127** (4), 045302 (2020). DOI: 10.1063/1.5130148
- [24] P. Jagtap, E. Chason. *Acta Mater.*, **193**, 202 (2020). DOI: 10.1016/j.actamat.2020.04.013
- [25] A.L. Shull, F. Spaepen, *J. Appl. Phys.*, **80** (11), 6243 (1996). DOI: 10.1063/1.363701
- [26] R. Koch, D. Hu, A.K. Das. *Phys. Rev. Lett.*, **94** (14), 146101 (2005). DOI: 10.1103/PhysRevLett.94.146101
- [27] E. Chason. *Thin Solid Films*, **526**, 1 (2012). DOI: 10.1016/j.tsf.2012.11.001
- [28] E. Chason, P.R. Guduru. *J. Appl. Phys.*, **119** (14), 191101 (2016). DOI: 10.1063/1.4949263
- [29] C.W. Pao, S.M. Foiles, E.B. Webb, D.J. Srolovitz, J.A. Floro. *Phys. Rev. Lett.*, **99** (3), 036102 (2007). DOI: 10.1103/PhysRevLett.99.036102
- [30] C.W. Pao, S.M. Foiles, E.B. Webb, D.J. Srolovitz, J.A. Floro. *Phys. Rev. B - Condens. Matter. Mater. Phys.*, **79** (22), 224113 (2009). DOI: 10.1103/PhysRevB.79.224113
- [31] X. Zhou, X. Yu, D. Jacobson, G.B. Thompson. *Appl. Surf. Sci.*, **469**, 537 (2019). DOI: 10.1016/j.apsusc.2018.09.253
- [32] A.S. Babushkin, A.N. Kupriyanov. *J. Surf. Investig.*, **16** (6), 960 (2022). DOI: 10.1134/S1027451022060052
- [33] S. Plimpton. *J. Comput. Phys.*, **117** (1), 1 (1995). DOI: 10.1006/jcph.1995.1039
- [34] A. Stukowski. *Modelling and Simulation in Mater. Sci. Eng.*, **18** (1), 015012 (2009). DOI: 10.1088/0965-0393/18/1/015012
- [35] S.M. Foiles, M.I. Baskes, M.S. Daw. *Phys. Rev. B.*, **33** (12), 7983 (1986). DOI: 10.1103/PhysRevB.33.7983
- [36] W.M. Choi, Y. Kim, D. Seol, B.J. Lee. *Comput. Mater. Sci.*, **130**, 121 (2017). DOI: 10.1016/j.commatsci.2017.01.002
- [37] A.C. Бабушкин, И.В. Уваров, И.И. Амиров. *ЖТФ*, **88** (12), 1845 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.12.46786.37-18 [A.S. Babushkin, I.V. Uvarov, I.I. Amirov. *Tech. Phys.*, **63**, 1800 (2018). DOI: 10.1134/S1063784218120228]
- [38] A.C. Бабушкин, Р.В. Селюков. *Труды ФТИАН. Т. 28: Квантовые компьютеры, микро- и нанoeлектроника: физика, технология, диагностика и моделирование*, отв. ред. Т.М. Махвиладзе (Наука, М., 2019), с.112.
- [39] W. Gruber, C. Baetz, M. Horisberger, I. Ratschinski, H. Schmidt. *Appl. Surf. Sci.*, **368**, 341 (2016). DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.02.015
- [40] J.F. Ziegler, J.P. Biersack. *The Stopping and Range of Ions in Matter*. In: Bromley, D.A. (eds) (*Treatise on Heavy-Ion Science*. Springer, Boston, MA, 1985), DOI: 10.1007/978-1-4615-8103-1_3