

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

В.В. Карзанов, Д.С. Королев

ИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ КРЕМНИЯ

Практикум

Рекомендовано методической комиссией физического факультета для студентов, обучающихся по следующим направлениям подготовки:

210100 – «Электроника и наноэлектроника»,

222900 – «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Нижегород
2013

УДК 538.9(076) + 621.315.592(076)
ББК В37я73-4
К22

К22 Карзанов В.В., Королев Д.С. ИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ КРЕМНИЯ: Практикум. Нижний Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, 2013. – 21 с.

Рецензент: д.ф.-м.н., профессор **Д.И. Тетельбаум**

Целью настоящего лабораторного практикума является ознакомление с технологией ионной имплантации, освоение физических основ технологического процесса и овладение навыками расчета распределений ионов в твердых телах с помощью программы компьютерного моделирования методом Монте-Карло.

Практикум предназначен для студентов физического факультета ННГУ, обучающихся по направлениям подготовки: 210100 – «Электроника и наноэлектроника», 222900 – «Нанотехнологии и микросистемная техника».

Практикум разработан при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (соглашение 14.В37.21.0132).

Ответственный за выпуск:
председатель методической комиссии физического факультета ННГУ,
к.ф.-м.н., доцент Сдобняков В.В.

УДК 538.9(076) + 621.315.592(076)
ББК В37я73-4

© Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского, 2013

Цель работы: освоение методов количественного определения параметров профиля распределения ионно-имплантированной примеси и основных свойств ионно-легированных полупроводниковых слоев на примере кремния.

Введение

В настоящее время ионная имплантация – ключевой этап в технологии создания интегральных микросхем и многих других полупроводниковых устройств и приборов.

В узком понимании ионная имплантация – технологический прием внедрения ускоренных ионов в твердую мишень с целью ее легирования. В широком смысле этот термин означает научно-техническое направление, находящееся на стыке физики твердого тела, радиационной физики, неравновесной термодинамики, физической химии, математической статистики, использующее достижения вакуумной техники и техники высоких напряжений, целью которого является управление свойствами материалов с помощью ионных пучков; здесь внедрение ионов – эпизод в длинной цепочке процессов, происходящих в твердом теле как непосредственно при имплантации, так и при его последующей релаксации.

Наибольшие успехи ионной имплантации были достигнуты в области планарной технологии полупроводниковых приборов и интегральных схем. Именно с ионной имплантацией в значительной степени связано бурное развитие микроэлектроники в последние десятилетия.

В данной лабораторной работе изучаются свойства ионно-легированных слоев кремния. Работа состоит из двух частей. В первой ставится задача количественного определения профиля распределения внедренной примеси с помощью программы TRIM. Во второй части экспериментально измеряются наиболее важные параметры ионно-легированного слоя (тип носителей заряда, проводимость, глубина залегания p-n-перехода), а также выясняется роль постимплантационного отжига.

Ионные ускорители и основные режимы ионной имплантации

Процесс ионного внедрения реализуется на высоковакуумных установках, называемых ионными ускорителями или имплантерами. Основные

блоки ускорителя схематично показаны на рис.1, здесь же указаны типичные габариты таких аппаратов.

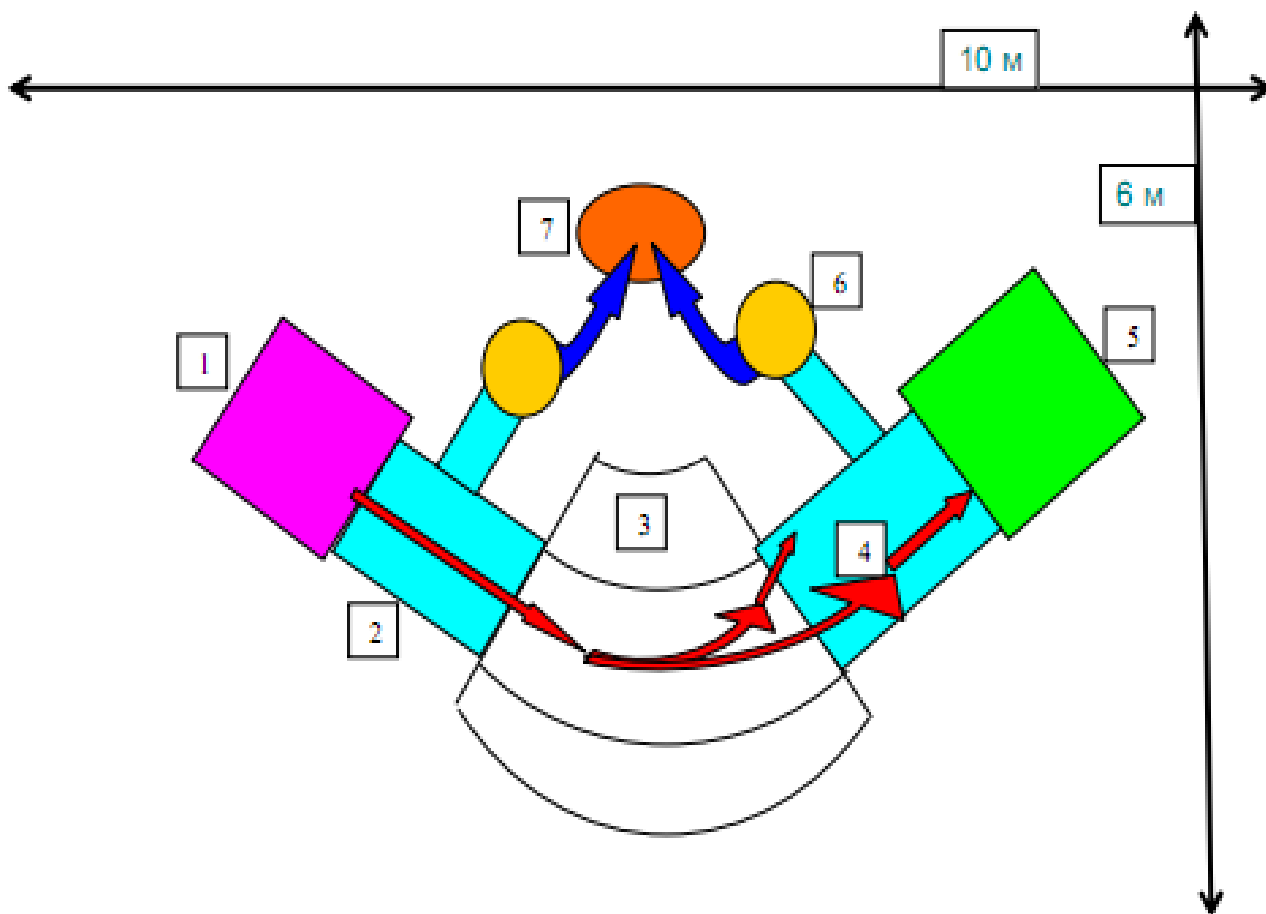


Рис. 1. Схема ионно-лучевого ускорителя.

1 – источник ионов, 2 – ионопровод, 3- магнит масс-сепаратора, 4 – траектория ионов, 5 – приёмник ионов (коллектор), 6 – насосы высокого вакуума, 7 – форвакуумный насос

При выполнении ионного внедрения задаются следующие важнейшие параметры:

- энергия ионов E , измеряется в килоэлектронВольтах (кэВ), в технологии легирования обычно используют энергии от 1 до 500 кэВ; величина энергии определяется ускоряющим напряжением между ионным источником и мишенью; от нее зависит глубина залегания примеси;

- доза внедрения Φ , единицы измерения – ион/см² (в научной литературе обычно используют см⁻²) или мкКл/см² (переход от одних единиц к другим – через значение заряда электрона), для легирования, как правило, используют интервал 10^{13} - 10^{15} ион/см²; от нее зависит концентрация легирующей примеси;

• плотность ионного тока j , здесь единицами являются, соответственно, ион/(см² с) или мкА/см², в зависимости от типа и особенностей конструкции ионного источника применяются значения от 10 нА/см² до 10 мА/см²; от нее зависит время достижения требуемой дозы легирования.

В некоторых специальных случаях необходимо задать и температуру имплантации T . Если требуется поддерживать температуру ниже комнатной, то этого добиваются продувкой паров жидкого азота через систему охлаждения, вмонтированную в мишень. В технологии чаще возникает необходимость проводить «горячую» имплантацию, в этом случае нагрев мишени обеспечивают с помощью ламп накаливания, размещенных в коллекторном устройстве, излучение которых направлено на мишень (разогрев происходит радиационно).

Основные положения теории Линдхарда-Шарфа-Шиотта

Когда ставится задача об ионном легировании, то сразу возникают вопросы о глубине проникновения внедряемой примеси и ее пространственном распределении. Ответы на них дает теория пробегов или теория Линдхарда-Шарфа-Шиотта (ЛШШ) [1, 2].

Исходный постулат теории ЛШШ - при внедрении в твердую мишень движущийся ион теряет энергию по двум независимым каналам: первый – столкновения с атомными ядрами, второй – возбуждение электронной подсистемы. Следовательно, для энергетических потерь можно записать следующее соотношение:

$$\frac{dE}{dx} = -N[S_n(E) + S_e(E)], \quad (1)$$

где E [кэВ] – энергия иона в точке x , N [см⁻³] – число атомов мишени в единице объема, $S_n(E)$ [кэВ·см²] – ядерная тормозная способность, $S_e(E)$ [кэВ·см²] – электронная тормозная способность. Отсюда средний полный пробег иона с начальной энергией E_0 :

$$\langle R \rangle = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} \frac{E}{[S_n(E) + S_e(E)]} dE. \quad (2)$$

Таким образом, если знать зависимости S_n и S_e от энергии, то можно рассчитать пробег ионов.

Расчет ядерной тормозной способности сводится к известной задаче о столкновении двух заряженных частиц [3]. Атомное ядро налетающего иона взаимодействует с атомными ядрами атомов мишени по закону Кулона.

Энергия отдачи при столкновении определяется скоростью падающего иона, массами ядер, их зарядами и прицельным расстоянием. Роль электронных оболочек учитывается через функцию экранирования. Поскольку ядро налетающего иона одновременно взаимодействует со всеми ядрами мишени, то следует проинтегрировать результат одиночного столкновения по прицельным расстояниям от нуля до бесконечности. При точном решении задачи появляются уравнения с тригонометрическими функциями, что приводит к техническим сложностям в получении окончательного результата. Точный учет электронного экранирования в виде потенциала Томаса-Ферми делает вообще не возможным получение аналитического выражения для ядерной тормозной способности, здесь возможно только численное решение. Но, если высокая точность несущественна, то эту ситуацию можно упростить, приняв, во-первых, в качестве экранирующей функции простое приближение $f=a/r$, где a – радиус экранирования (обычно эта величина около 0,1 Ангстрема), r – расстояние между ядрами налетающего иона и атома мишени, а во-вторых учесть, что рассеяние на большие углы и, соответственно, большие энергии отдачи имеют место лишь на прицельных расстояниях порядка a и меньше, в то время как межатомные расстояния на один-два порядка больше. Следовательно, большинство ионов будет двигаться в межатомном пространстве мишени с большими прицельными расстояниями и отклоняться на малые углы. В этом случае в уравнениях, описывающих столкновения, можно заменить тригонометрические функции либо на их аргументы, либо приравнять их к единице, и тогда эти уравнения становятся алгебраическими. Это приближение называют нулевым, выражение для ядерной тормозной способности в этом случае имеет вид, не зависящий от энергии:

$$S_n^0 = 2,8 \cdot 10^{-15} \cdot \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}} \cdot \frac{M_1}{(M_1 + M_2)}, \quad (3)$$

где Z_1 и M_1 – порядковый атомный номер и атомная масса иона, Z_2 и M_2 – порядковый атомный номер и атомная масса атомов мишени.

Для оценок электронной тормозной способности в теории ЛШШ предложена простая модель: электроны в мишени – газ, а ион – шарик, который ламинарно движется в нем. В этом случае торможение пропорционально скорости или корню квадратному из кинетической энергии, т.е.

$$S_e = k \cdot E^{1/2}, \quad (4)$$

где коэффициент k – функция порядковых номеров и атомных масс иона и атомов мишени. В случае кремния $k \approx 0,2 \cdot 10^{-15} \text{ эВ}^{1/2} \cdot \text{см}^2$. Данная модель применима при условии, что скорость иона должна быть много меньше

скорости электронов на поверхности Ферми. Поскольку в ионной имплантации применяются энергии пучков в десятки и сотни кэВ, то это условие выполняется практически всегда.

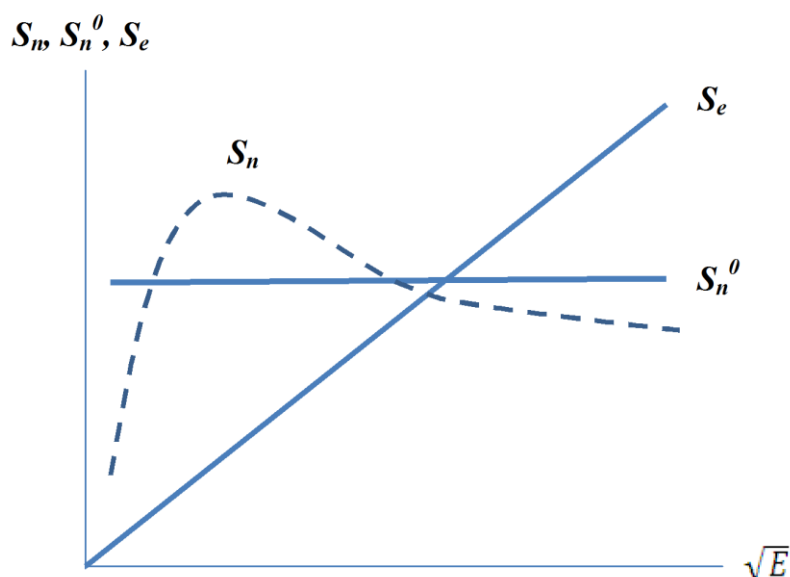


Рис. 2. Качественный вид зависимостей S_n^0 (нулевое приближение), S_n (точный расчет с применением потенциала Томаса-Ферми) и S_e от энергии движущегося иона

О. Б. Фирсовым была предложена более обоснованная модель электронного торможения, суть которой заключается в обменном взаимодействии атомных оболочек иона и атомов мишени. Результат здесь получился такой же: $S_e \sim E^{1/2}$, а численные значения оказались близкими к тем, что предсказывала модель Линдхарда.

На рис.2 показан качественный вид зависимостей S_n^0 , S_n и S_e от энергии иона. Точные значения S_n и S_e для разных энергий и комбинаций мишень-ион можно найти в [2].

Таким образом, выражения (2)-(4) позволяют сравнительно просто оценить полный средний пробег. Ситуация становится совсем простой, если преобладает один из двух механизмов торможения, т.е. $S_n \gg S_e$ или $S_n \ll S_e$. Тогда для полного среднего пробега можно записать (энергия – в электронВольтах, пробег – в Ангстремах):

$$\langle R \rangle \approx 0,7 \cdot E_0 \cdot \frac{(Z_1^{3/2} + Z_2^{3/2})^{1/2}}{Z_1 Z_2} \cdot \frac{(M_1 + M_2)}{M_1}, \text{ для случая } S_n \gg S_e, \quad (5)$$

$$\langle R \rangle \approx 20 \cdot (E_0)^{1/2}, \text{ для случая } S_n \ll S_e. \quad (6)$$

При движении внутри мишени налетающие ионы обычно сильно отклоняются от первоначального направления, при этом каждый ион будет иметь свою индивидуальную серию столкновений и, соответственно, индивидуальные координаты остановки. Таким образом, внедренная примесь распределится по глубине, ее концентрация окажется функцией координаты $N(x)$. Отрезок, соединяющий точку влета иона в мишень с точкой остановки, называют пробегом (обычно его обозначают R , но не следует путать его с полным средним пробегом), проекцию пробега на направление первоначального движения – проецированным пробегом (обозначают R_p). Поскольку количество падающих на мишень ионов очень большое (обычно дозы внедрения бывают $\Phi \gg 10^{12} \text{ см}^{-2}$), то задачу об их пространственном распределении авторы теории ЛШШ рассмотрели методами математической статистики. Точный результат этого рассмотрения не выражается в элементарных функциях, а приближенно его можно описать следующим выражением, названным распределением Пирсона:

$$N(x) = \frac{2\Phi}{\sqrt{2\pi \cdot \Delta R_p^2} (1 + \operatorname{erf}(\frac{\langle R_p \rangle}{\sqrt{2 \cdot \Delta R_p^2}}))} \cdot \exp(-\frac{(x - \langle R_p \rangle)^2}{2 \cdot \Delta R_p^2}), \quad (7)$$

где Φ – доза внедренных ионов, $\langle R_p \rangle$ – средний проецированный пробег, ΔR_p – дисперсия проецированных пробегов, $\operatorname{erf}(\dots)$ – функция ошибок, x – координата в направлении первоначального движения ионного пучка (начало отсчета – на поверхности мишени).

Для практических целей, особенно в тех случаях, когда $\langle R_p \rangle$ составляет несколько десятых долей микрометра или меньше, чаще пользуются более простым распределением Гаусса:

$$N(x) = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi \cdot \Delta R_p^2}} \cdot \exp(-\frac{(x - \langle R_p \rangle)^2}{2 \cdot \Delta R_p^2}). \quad (8)$$

На рис.3 представлен качественный вид распределений (7) и (8). Можно заметить, что вблизи максимума распределения обе кривые совпадают, существенные отличия проявляются на крыльях.

Количественные значения $\langle R_p \rangle$ и ΔR_p для наиболее важных практических случаев можно найти в книге [2]. Наиболее полная информация приводится в справочнике [4]. Параметры распределений можно оценить и по приближенным формулам:

$$\langle R_p \rangle \approx \frac{\langle R \rangle}{(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{M_2}{M_1})}, \quad (9)$$

$$(\Delta R_p)^2 \approx \frac{2}{3} \langle R_p \rangle^2 \cdot \frac{M_1 \cdot M_2}{(M_1 + M_2)^2}, \quad (10)$$

здесь $\langle R \rangle$ - полный средний пробег, определенный по формуле (2).

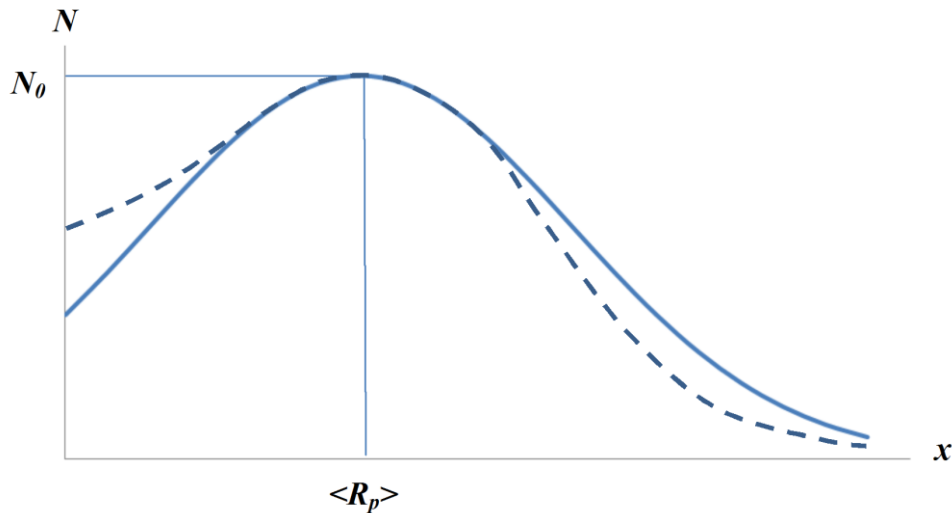


Рис. 3. Качественный вид распределений Гаусса (сплошная кривая) и Пирсона (штрихи). $\langle R_p \rangle$ - средний проецированный пробег, соответствующий координате

$$\text{максимума распределения } N_0 = \frac{\Phi}{\sqrt{2\pi \cdot \Delta R_p^2}}.$$

Строго говоря, все приведенное выше справедливо для аморфных материалов, поскольку не учитывалась конкретная кристаллическая структура мишени. В кристаллах наблюдается эффект каналирования: движение внедряемых ионов в межатомном пространстве вдоль кристаллографического направления с низкими индексами. В этом случае ионы почти не испытывают ядерного торможения, преобладают электронные потери, и внедряемая примесь проникает на значительные глубины. Профиль распределения при этом растягивается в глубину образца и существенно отличается в «хвостовой» части от того, что предсказывается формулами (7) и (8). В промышленной технологии каналирование обычно является нежелательным эффектом. Для его подавления используют разные способы: ориентация кристаллических пластин вдоль направлений с большими индексами, предварительная аморфизация поверхности, имплантация через тонкие аморфные пленки и т.д. Однако для легких ионов полностью исключить этот эффект не удастся. Считается, что из-за каналирования, например, профиль бора в кремнии сильно «размыт» и плохо описывается выражениями (7) и (8).

Расчет пробегов и профилей внедренной примеси методом Монте-Карло (компьютерная программа TRIM)

С развитием вычислительной техники пробеги и профили внедренной примеси для различных комбинаций ион-мишень стало возможным рассчитывать численно. Наибольшее распространение получил метод случайных величин, названный Монте-Карло. Впервые результаты, полученные этим методом, были представлены в работе П.В.Павлова с сотрудниками [5]. В последние годы получила международное признание компьютерная программа TRIM [6] (ее последние модификации обозначаются SRIM). На сегодняшний день имеется несколько ее версий, одна из которых используется в данной работе.

Суть метода Монте-Карло заключается в розыгрыше через генератор случайных чисел важных для какого-либо процесса параметров. В случае ионного внедрения такими параметрами являются свободный пробег между столкновениями для падающего иона и его прицельное расстояние перед столкновением с атомом мишени. Остальные величины, такие как плотность и состав мишени, атомные массы, начальная энергия иона, энергия смещения атомов мишени, толщина мишени, задаются постоянными на первых шагах реализации программы. Компьютер прослеживает траекторию каждого упавшего иона, последовательно решая задачу о столкновении двух заряженных частиц. При этом каждый раз регистрируются следующее: потеря энергии на участке свободного пробега, потеря энергии при столкновении с атомом мишени, угол отклонения от первоначального направления, вылет атома мишени из узла (если энергия отдачи больше энергии смещения). Затем ситуация разыгрывается заново с учетом произошедшего столкновения. В качестве критерия остановки обычно полагают условие: остаточная кинетическая энергия движущегося иона не превышает энергию смещения атома мишени. На этом этапе компьютер фиксирует координаты иона. Современные версии программы TRIM позволяют получать информацию не только о распределении внедренной примеси, но о произведенных смещениях, о распределении вакансий и междоузельных атомов, о распылении мишени. Для получения параметров распределения имплантированной примеси и точечных дефектов необходимо выполнить большую серию подобных испытаний, обычно рекомендуется несколько тысяч (число испытаний задается в начале программы).

В настоящей работе ставится задача с помощью программы TRIM определить профиль распределения имплантированного бора в n-кремнии без учета каналирования и на основании этого предсказать ожидаемую глубину p-n перехода.

Отжиг ионно-легированных слоев

Процесс ионного внедрения сопровождается интенсивным дефектообразованием, т.к. энергия падающего иона на несколько порядков превышает энергию смещения атомов мишени. Возникающие при этом дефекты являются неравновесными, их часто называют радиационными. Простейшие дефекты (одионочные вакансии и междоузельные атомы) имеют малые времена жизни при температурах, близких к комнатной. Но при релаксации они взаимодействуют между собой и с примесями, образуя различные электрически активные комплексы, устойчивые и к воздействию повышенных температур. Эти комплексы вносят в запрещенную зону полупроводника донорные и акцепторные уровни, компенсируя легирующую примесь. В случае кремния наиболее известными комплексными дефектами являются пентовакансии (амфотерный центр), E-центры (вакансия + элемент V группы, глубокий акцептор), A-центры (вакансия + атом кислорода, глубокий акцептор), вакансия + элемент III группы (глубокий донор, установившегося обозначения нет). Поскольку каждый падающий ион производит сотни и тысячи смещений, то количество электрически активных дефектов может быть значительно больше, чем внедренной примеси. В результате эффект легирования, ради которого выполнялась ионная имплантация, может оказаться подавлен дефектообразованием. Именно с этим столкнулись первые исследователи ионного внедрения (см. исторический обзор в [2]). Кроме того, значительная часть введенной примеси может оказаться в «неправильном» структурном положении и, соответственно, не проявлять себя как донор или акцептор.

Эту проблему обычно решают с помощью термической обработки (отжиг), тем самым стремятся приблизить состояние облученного материала к термодинамическому равновесию. Данную процедуру проводят в инертной среде, чтобы исключить термическое окисление кремния. Во время отжига устраняются многие электрически активные дефекты, а внедренная примесь занимает нужное структурное положение (в случае элементов III или V группы в кремнии – это положение замещения).

При термообработке может наблюдаться эффект «отрицательного отжига», т.е. снижение доли электрически активной внедренной примеси в процессе отжига относительно начального уровня. Наиболее сильно этот эффект проявляется в кремнии, легированном бором, при температурах 300-400 °С. При этих температурах разрушаются комплексы с участием атомов кремния, а далее междоузельные кремниевые атомы выталкивают из узловых положений примесные атомы бора и встают на их место (реакция замены по Уоткинсу). При температурах около 500 °С и выше отжигаются вакансионные комплексы, одиночные вакансии аннигилируют с бором, повышая долю примеси в узлах кристаллической решетки, таким образом происходит активация примеси. Оптимальной температурой отжига ионно-легированного кремния считается 800 °С в течение 30 мин. Более продолжительные отжики или применение более высоких температур позволяет отжечь больше сложных дефектов и, тем самым, улучшить качество легированного слоя. Но при этом включаются диффузионные процессы, которые приводят к плохо воспроизводимому «размытию» профиля распределения примеси, а значит и к плохо воспроизводимым свойствам легированного слоя.

Таким образом процедура ионного легирования полупроводников обязательно содержит два важнейших этапа: непосредственно имплантация примеси и постимплантационный отжиг.

Основные параметры ионно-легированных слоев

Завершающим шагом ионной имплантации является контроль параметров легированного слоя, важнейшие среди них следующие:

- 1) тип проводимости;
- 2) поверхностное сопротивление ρ_s ;
- 3) поверхностная концентрация носителей заряда n_s ;
- 4) подвижность носителей в легированном слое μ ;
- 5) глубина залегания р-п-перехода x_j ;
- 6) коэффициент использования внедренной примеси $f = n_s / \Phi$.

Тип проводимости обычно определяют методом термо-эдс, поверхностное сопротивление – четырехзондовым методом. Для измерения поверхностной концентрации носителей и их подвижности применяют эффект Холла в сочетании с измерением сопротивления. Зная поверхностную концентрацию и дозу внедрения примеси, можно подсчитать коэффициент использования.

При отработке технологии создания приборов бывает важно знать среднее сопротивление $\langle \rho \rangle = \rho_s \cdot x_j$ и среднюю концентрацию носителей $\langle n \rangle = n_s \cdot x_j$ в легированном слое.

Определение глубины залегания р-п перехода

Определение глубины залегания р-п переходов (x_j), расположенных близко к поверхности, может быть осуществлено несколькими методами. В настоящей работе для определения глубины залегания р-п перехода используется метод шарового шлифа. В образце кремния металлическим шаром производится вышлифовка углубления, которое пересекает границу р-п перехода, как показано на рис.4.

Для измерения глубины залегания р-п перехода используются методы химического окрашивания или осаждения металлов, действующие на область одного типа проводимости и не оказывающие влияние на область другого типа проводимости. Поскольку электрохимические потенциалы кремния п- и р-типов различны, химические реакции в кремнии п- и р-типов протекают с различными скоростями. Если реакция протекает довольно быстро по одну сторону от перехода и медленно или вообще не протекает по другую сторону, то граница между прореагировавшим кремнием и кремнием, не участвующим в реакции, указывает положение р-п перехода. Положение этой границы используется для индикации р-п перехода.

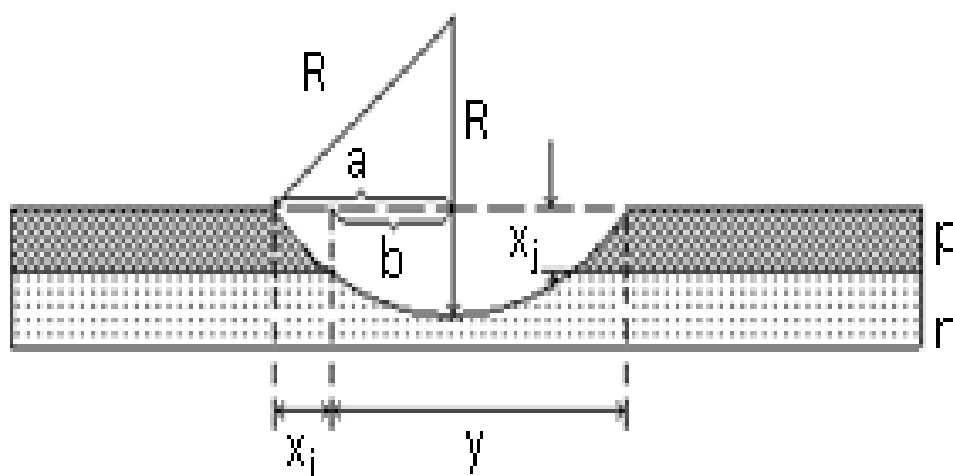


Рис. 4. Поперечное сечение образца при изготовлении шарового шлифа

В настоящей работе используется избирательный травитель, состоящий из концентрированной плавиковой кислоты с добавлением приблизительно 0,1% азотной кислоты. Травление производится при интенсивном освещении.

При попадании этого травителя на шлиф области р-типа темнеют, а цвет областей п-типа остается неизменным.

Из рис.4 видно, что

$$\left. \begin{array}{l} x = a - b \\ y = a + b \end{array} \right\}, \quad xy = a^2 - b^2$$

$$x_j = \sqrt{R^2 - b^2} - \sqrt{R^2 - a^2} = R \left(\sqrt{1 - \frac{b^2}{R^2}} - \sqrt{1 - \frac{a^2}{R^2}} \right) \quad (11)$$

Для $a, b \ll R$

$$x_j \approx R \left(1 - \frac{b^2}{2R^2} - 1 + \frac{a^2}{2R^2} \right) \approx \frac{a^2 - b^2}{2R^2} = \frac{x \cdot y}{2R} \quad (12)$$

или $x_j = \frac{x \cdot y}{D}$, где D – диаметр цилиндра.

Таким образом, для определения x_j необходимо с помощью микроскопа измерить величины x и y .

Задания

1. Оценить средний проецированный пробег и его дисперсию по формулам (6), (9), (10) для ионов бора в кремнии при энергиях ионного пучка 40 и 100 кэВ и сравнить их с табличными значениями.
2. Полагая распределение примеси гауссовым, используя результаты п.1, оценить глубину р-п-перехода, среднюю концентрацию носителей $\langle p \rangle$ и среднее удельное сопротивление $\langle \rho \rangle$ в р-слое на подложке п-кремния, ионно-легированной бором. Дозы внедрения: $\Phi_1=10^{13}$, $\Phi_2=10^{14}$ и $\Phi_3=10^{15}$ см⁻². Удельное сопротивление исходного п-кремния: $\rho=4,5$ Ом ·см. Подвижность дырок в ионно-легированном слое принять равной $\mu_p=100$ см²В⁻¹с⁻¹.
3. Используя программу TRIM, рассчитать профили распределения примеси бора в кремнии при энергиях ионного пучка 40 и 100 кэВ, оценить глубину р-п-перехода, среднюю концентрацию носителей $\langle p \rangle$ и среднее удельное сопротивление $\langle \rho \rangle$ в р-слое на подложке п-кремния, ионно-легированной бором. Использовать те же параметры, что и в п.2. Сравнить результаты с теми, что получились в п.п.1 и 2.
4. Экспериментально определить тип проводимости, поверхностное сопротивление, глубину р-п-перехода, среднее удельное сопротивление слоя, ионно-легированного бором, на образцах п-кремния до и после отжига. Сравнить экспериментальные данные с расчетными.

Вопросы для самоподготовки

1. Назначение и принцип действия основных узлов ионного ускорителя.
2. Основное соотношение для потерь энергии движущегося иона в мишени.
3. Принципы расчета ядерной и электронной тормозной способности.
4. Как выглядит профиль распределения внедренной примеси для аморфных и кристаллических мишеней?
5. В чем суть эффекта каналирования, как этот эффект сказывается на профиле распределения примесей? Какие еще эффекты могут влиять на профиль распределения примесей?
6. Что такое критический угол каналирования и как он зависит от энергии ионов?
7. Принципы метода Монте-Карло для расчета параметров пробега ионов в аморфных мишенях.
8. Зачем нужен отжиг ионно-легированных слоев?
9. В чем заключается эффект «отрицательного отжига»?
10. Важнейшие параметры ионно-легированных слоев. Какие существуют методы для их экспериментального определения?
11. Основные методы определения глубины p-n-перехода в полупроводниковых структурах. В чем заключается метод шарового шлифа?

Литература

1. Е.И. Зорин, П.В. Павлов, Д.И. Тетельбаум. Ионное легирование полупроводников. - М.: Энергия, 1975.
2. Х. Риссел, И. Руге. Ионная имплантация. - М.: Наука, 1983.
3. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Механика. - М.: Наука, 1975.
4. А.Ф. Буренков, Ф.Ф. Комаров, М.А. Кумахов, М.М. Темкин. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей. Минск: изд.БГУ, 1980.
5. П.В. Павлов и др. О распределении введенных атомов и радиационных дефектов при ионной бомбардировке кремния (расчет методом Монте-Карло) // ФТТ, 1966, т.8, в.9, с.2679-2687.
6. J.F. Ziegler. SRIM – The stopping and range of ions in matter (2010) / J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, J.P. Biersack // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B, 2010, Vol.268, P.1818-1823

Приложение 1. Расчет профилей распределения примесей с помощью программы TRIM

Для расчета пробега ионов в твердых телах используются различные программы компьютерного моделирования. Наибольшую популярность имеет программный пакет SRIM, который наряду с возможностью расчета пробегов позволяет получить и другую важную информацию: распределение вакансий в мишени, атомов отдачи и т.д. Интерфейс программы SRIM представлен на рисунке П1.

Однако при запуске программы есть один существенный нюанс – необходимость изменения региональных стандартов из-за несовместимости разрядности символов. Для этого необходимо выполнить следующий порядок действий: *Пуск* → *Панель управления* → *Язык и Региональные стандарты* и во вкладке *Форматы* изменить формат на *Английский (США)*.

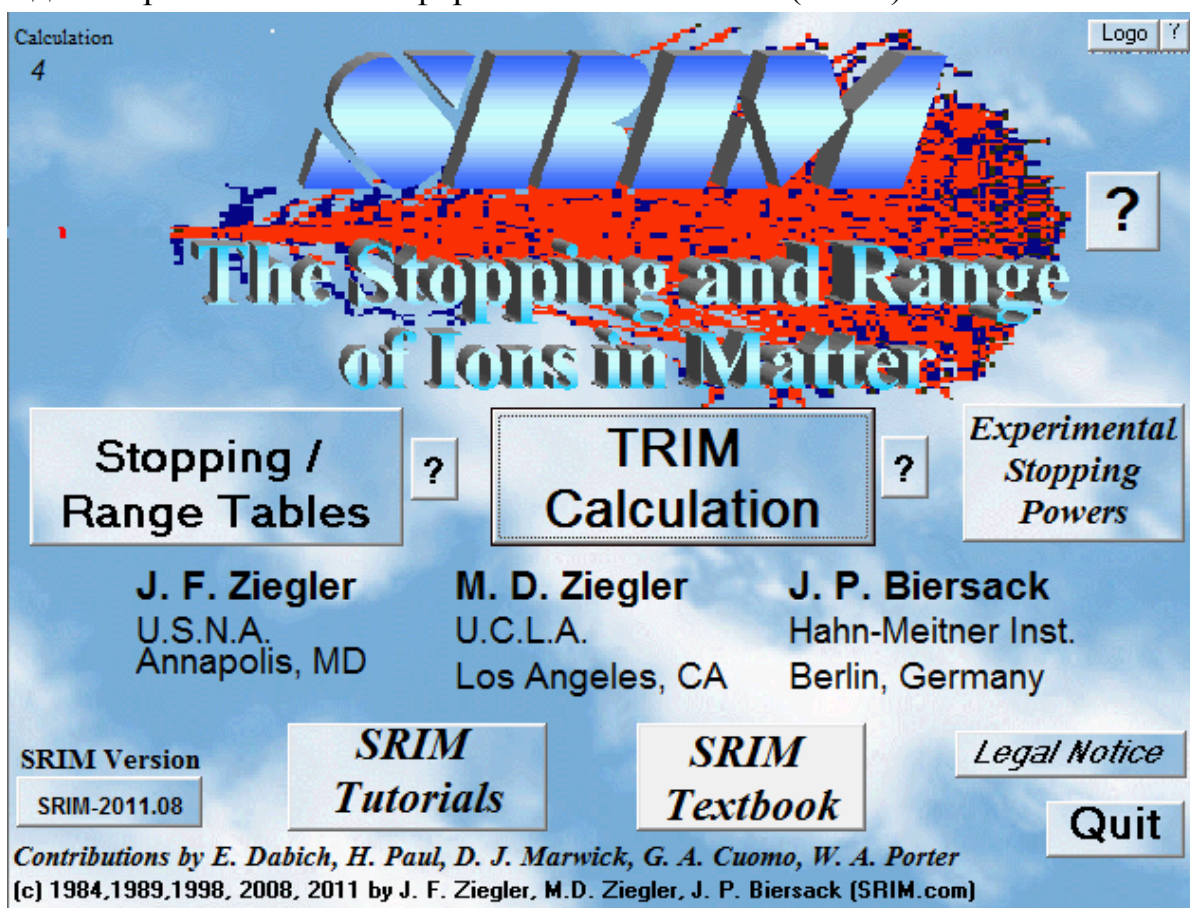


Рис. П1. Интерфейс главного меню

Для расчета профилей распределения ионов нажимаем на кнопку **TRIM Calculation**, после чего на экране появится меню выбора параметров расчета (рис. П2).

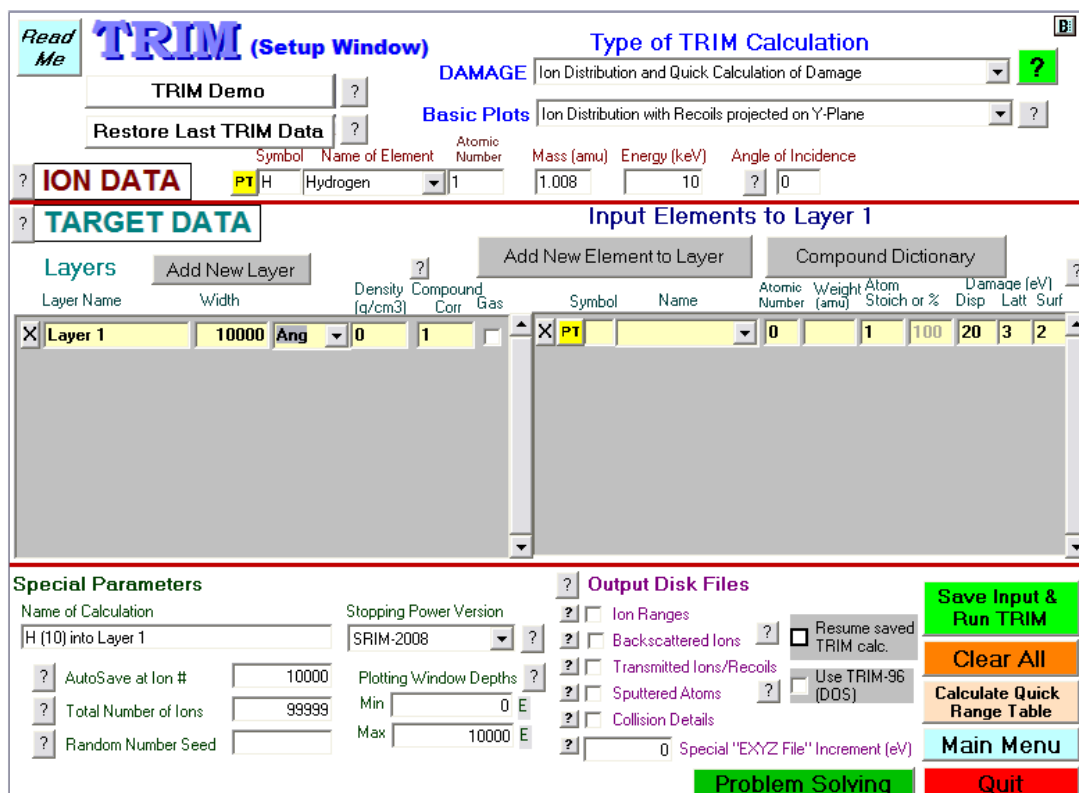


Рис. П2. Меню выбора параметров расчета

В правой верхней части окна необходимо выбрать тип расчета из нескольких приведенных:

- ***Ion Distribution and Quick Calculation of Damage*** - этот режим используется, если производится расчет конечного распределения ионов в мишени, потери энергии иона на ионизацию атомов мишени, передача энергии атомам отдачи, а также отслеживаются упруго отраженные и прошедшие ионы. При этом не рассматриваются детально процессы, связанные с распылением мишени и поведением атомов отдачи;

- ***Detailed Calculation with full Damage Cascades*** – в этом режиме дополнительно отслеживается каждый атом отдачи до тех пор, пока его энергия не станет меньше энергии смещения какого-либо атома мишени из равновесного положения;

- ***Monolayer Collision Steps / Surface Sputtering*** – в этом режиме дополнительно производится учет распыления поверхностных атомов и процессов их взаимодействия с падающими ионами.

Остальные режимы используются достаточно редко, поэтому здесь рассмотрены не будут.

В следующем выпадающем списке **Basic Plots** можно выбрать следующие режимы визуализации траектории ионов:

• ***Ion Distribution with Recoils projected on Y-Plane*** – распределение ионов и атомов отдачи в плоскости XY;

• ***Ion Distribution with Recoils projected on Z-Plane*** – распределение ионов и атомов отдачи в плоскости XZ;

• ***Ion Distribution only (no recoils) projected on Y-Plane*** – распределение только ионов в плоскости XY;

• ***Transverse Plot of Ions + Recoil Cascades, YZ-Plane*** – латеральная проекция распределения ионов и атомов отдачи (плоскость YZ);

• ***All FOUR of the above on one screen*** – все вышеперечисленные распределения одновременно;

• ***No Graphics*** – без вывода траектории (для ускорения вычислений).

Следует заметить, что система координат TRIM предполагает, что ось X направлена вглубь мишени перпендикулярно ее поверхности, оси Y,Z – в латеральной плоскости.

Ниже располагается раздел **Ion Data**, в котором задается тип бомбардирующего иона, его энергия (в кэВ), а также угол наклона первичного пучка относительно поверхности. Выбор иона производится путем нажатия на кнопку **PT**, которая вызывает Периодическую таблицу, а выбор угла – путем ввода значения (0-89,9°) в поле **Angle of Incidence**. В случае использования изотопа вещества имеется возможность изменить его молекулярную массу (поле **Mass**).

В разделе **Target Data** задаются характеристики мишени. Слева, в разделе **Layers**, задается количество слоев мишени. Добавление слоя производится с помощью кнопки **Add New Layer**, а удаление – крестиком слева от названия слоя. В поле **Layer Name** вводится название слоя, в поле **Width** – толщина слоя (в ангстремах, нм, мкм, мм, см, км), в поле **Density** – плотность мишени, **Compound Correction** – поправка, связанная с образованием химических соединений между атомами мишени. Пункт **Gas** выбирается в случае работы с газообразными веществами.

Для выбора веществ мишени есть два пути. Первый – это создание мишени из отдельных веществ. Для добавления нового вещества в имеющийся слой используется кнопка **Add New Element to Layer**, для удаления – крестик слева от названия удаляемого вещества. Другой путь предполагает выбор соединения из списка имеющихся в программе. Для добавления вещества служит кнопка **Compound Dictionary**. После добавления элементов можно изменять стехиометрию полученного соединения с помощью пункта **Atom Stoich** (в частях или в процентах), а также изменять установленные по

умолчанию энергию смещения атома из равновесия (**Disp**), энергию связи с решеткой (**Latt**) и энергию связи атомов с поверхностью (**Sput**).

В левом нижнем углу окна на рис. П2 располагается область **Special Parameters**. Здесь происходит изменение количества расчетных ионов **Total Numbers of Ions** и интервала сохранения результата **AutoSave at Ion**. Увеличение количества ионов повышает точность расчета, однако существенно увеличивает время расчета. Оптимальным количеством для расчета является несколько десятков тысяч ионов.

В разделе **Output Disk Files** выбираем те файлы, которые требуется сохранить:

- **Ion Ranges** – распределение ионов в матрице;
- **Backscattered Ions** – данные об упруго отраженных ионах;
- **Transmitted Ions / Recoils** – данные об ионах, пролетевших мишень насквозь;
- **Sputtered Atoms** – распыленные атомы мишени;
- **Collision Details** – информация о каскадах атомов отдачи.

После того, как были выбраны все вышеперечисленные параметры, нажимаем кнопку **Save Input & Run TRIM**. В результате запускается окно вычислений, которое представлено на рис. П3.

• **Ion Distribution** – распределение ионов в мишени. Измеряется в (атом/см³) / (атом/см²). Для получения концентрации ионов необходимо эту величину умножить на их дозу. Для сохранения данных необходимо пользоваться следующим режимом;

• **Ion / Recoil Distribution** – распределение ионов и атомов отдачи. Сохраненный файл имеет имя RANGE.TXT;

• **Lateral Range** – распределение ионов в латеральной плоскости. Сохраненный файл имеет имя LATERAL.TXT;

• **Ionization** – энергия, переданная электронам мишени. Данные, обозначенные «Ions» отвечают за передачу энергии напрямую от ионов, «Recoils» – от атомов отдачи. Сохраненный файл – IONIZ.TXT;

• **Phonons** – энергия, переданная ионами и атомами отдачи на образование фононов. Сохраненный файл – PHONON.TXT;

• **Energy to Recoils** – энергия, переданная ионами атомам мишени. Данные сохраняются в файле E2REC.TXT;

• **Damage Events** – распределение вакансий в мишени. Данные сохраняются в файле VACANCY.TXT.

Остальные режимы дублируют перечисленные при выборе сохраняемых файлов в разделе **Output Disk Files**.

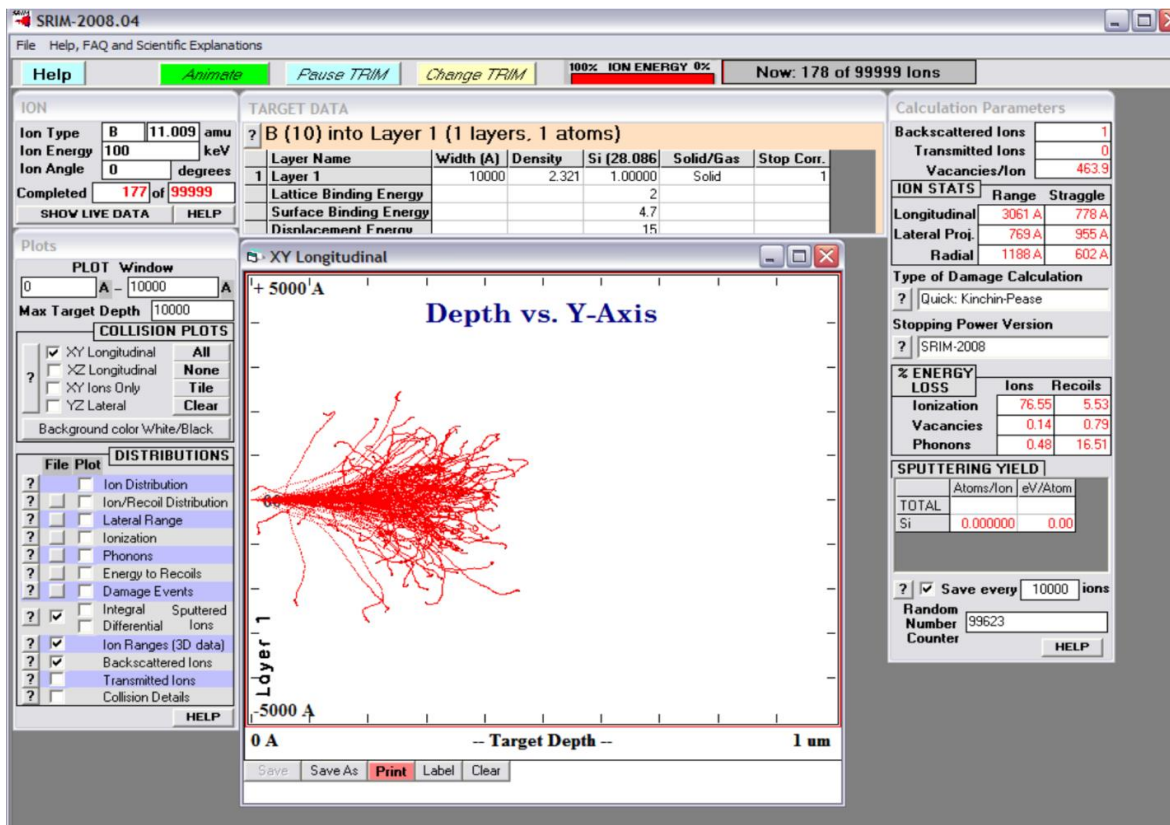


Рис. ПЗ. Окно расчета параметров

Вадим Вячеславович **Карзанов**
Дмитрий Сергеевич **Королев**

ИОННОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ КРЕМНИЯ

Практикум

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования «Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского»
603950, Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Подписано в печать Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1,3. Уч.-изд. л.
Заказ № . Тираж 100 экз.

Отпечатано в типографии Нижегородского госуниверситета
им. Н.И. Лобачевского
603600, г. Нижний Новгород, ул. Большая Покровская, 37