

ПОЛУЧЕНИЕ СТРУКТУР МЕТОДОМ ИОННОГО ЛЕГИРОВАНИЯ

1. Физические представления о ионном легировании

Метод ионного легирования (ионной имплантации) состоит в бомбардировке пучками ускоренных ионов с энергиями от 10 кэВ до 1 МэВ твердых тел с целью изменения их свойств и структуры.

Основные явления при имплантации. Ускоренные ионы проникают в кристаллическую решетку, преодолевая отталкивающее противодействие положительных зарядов ядер атомов. Глубина проникновения ионов возрастает с увеличением их энергии. Легкие ионы проникают более глубоко, чем тяжелые, однако траектории движения тяжелых ионов более прямолинейны. При точной ориентации направления падения пучка ионов вдоль одной из кристаллографических осей пластины полупроводника— (110) или (111) — часть ионов движется вдоль атомных рядов, между которыми имеются достаточно широкие каналы, свободные от атомов. Это явление называют **каналированием**. Попав в канал, ионы испытывают менее сильное торможение и проникают в несколько раз глубже, чем в случае неориентированного внедрения. Если энергия, переданная атому решетки, превышает энергию связи атомов в твердом теле, то атом покидает узел. В результате образуется пара Френкеля — дефект, состоящий из вакансии и междоузельного атома. Атомы, находящиеся в поверхностном слое, получив энергию от иона; могут отрываться от кристалла — происходит процесс распыления и образуется дефект по Шотки — вакансия в приповерхностной области кристалла. Энергия первично смещенного атома, называемого атомом отдачи, сравнительно велика, поэтому на пути своего движения атом отдачи образует целый каскад смещений, вследствие чего в кристалле возникают отдельные разупорядоченные зоны размером 3—10 нм. По мере имплантации ионов идет накопление радиационных дефектов. Когда плотность ионов, внедренных на единицу поверхности, превосходит критическую, называемую дозой аморфизации, образуется сплошной аморфный слой. Внедренный ион может попасть в вакантный узел, став донором или акцептором, но вероятность замещения узлов мала. Большинство внедренных ионов находится в междоузлиях, где они не являются электрически активными. Для перевода их в узлы и восстановления кристаллической структуры полупроводника производят отжиг. В процессе отжига происходят распад и аннигиляция радиационных дефектов, а внедренные примеси занимают вакантные узлы, в результате чего образуется слой с электропроводностью р- или n-типа.

Средний полный пробег иона. Глубина проникновения иона в вещество характеризуется пробегом. Траектории отдельных ионов в кристалле подобны ломаным линиям, каждый прямолинейный участок и полная длина которых отличаются друг от друга. Вся совокупность пробегов отдельных ионов группируется по закону нормального распределения случайной величины со значением среднего полного пробега R и среднеквадратичным отклонением

пробега ΔR . Практическую важность имеет средний нормальный пробег R_p — проекция траектории среднего полного пробега на направление первоначальной скорости иона и его среднеквадратичное отклонение ΔR_p . Для расчета среднего полного пробега R (см) иона с энергией E (эВ) используют формулы, в которых энергия и пробег выражены в безразмерных единицах ε и ρ соответственно:

$$R = \rho / L, \quad (1)$$

$$\rho = \frac{2}{k} \varepsilon^{1/2} \left(1 + \frac{\varepsilon k}{3\beta} \right) - \frac{2c/k}{k\sqrt{c/k+d}} \arctg \left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{c/k+d}} \right), \quad (2)$$

$$\varepsilon = FE \quad (3)$$

$$L = \pi a^2 \gamma N_2, \quad F = \frac{6,9 \cdot 10^6 a M_2}{Z_1 Z_2 (M_1 + M_2)}. \quad (4)$$

Здесь L — нормирующий множитель пробега, см^{-1} ; F — нормирующий множитель энергии, $1/\text{эВ}$.

Радиус экранирования заряда ядра атомными электронами (см)

$$a = \frac{4,7 \cdot 10^{-9}}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}}. \quad (5)$$

Коэффициент передачи ионом с массой M_1 атому с массой M_2 максимально возможной, энергии при лобовом столкновении

$$\gamma = 4M_1 M_2 / (M_1 + M_2)^2. \quad (6)$$

Коэффициенты, учитывающие торможение, обусловленное электронным взаимодействием,

$$k = 2,47 \cdot 10^{11} Z_1^{2/3} \sqrt{Z_2 / M_2} [a(1 + M_2 / M_1)]^{3/2} \quad (7)$$

$$\beta = 6,16 \cdot 10^3 Z_2 M_1 F. \quad (8)$$

Параметры, учитывающие торможение, обусловленное ядерным взаимодействием, $c = 0,45$, $d = 0,3$.

Собственная концентрация атомов в кристалле $N_2, \text{см}^{-3}$, заряды ядер иона Z_1 атомов мишени Z_2 .

Рассмотрим пример расчета среднего полного пробега.

Пример 1. Рассчитать средний полный пробег ионов бора с энергией $E=100$ кэВ в кремнии.

1. Для расчета необходимо определить радиус экранирования a , коэффициент передачи максимальной энергии γ , параметры электронного торможения k и β , нормирующие множители L и F . С помощью справочника находим атомные номера и массы бора и кремния и собственную концентрацию атомов в кремнии: $Z_1 = 5$, $Z_2 = 14$, $M_1 = 11$, $M_2 = 28,09$, $N_2 = 4,98 \cdot 10^{22} \text{см}^{-2}$.

2. Радиус экранирования

$$a = \frac{4,7 \cdot 10^{-9}}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}} = \frac{4,7 \cdot 10^{-9}}{(5^{2/3} + 11^{2/3})^{1/2}} = 1,59 \cdot 10^{-9} \text{см}.$$

3. Коэффициент передачи максимальной энергии

$$\gamma = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{4 \cdot 11 \cdot 28,09}{(11 + 28,09)^2} = 0,81.$$

4. Коэффициент электронного торможения

$$k = 2,47 \cdot 10^{11} Z_1^{2/3} \sqrt{Z_2 / M_2} [a(1 + M_2 / M_1)]^{3/2} = 2,47 \cdot 10^{11} 5^{2/3} (14 / 28,09)^{1/2} \times \\ \times [1,59 \cdot 10^{-9} (1 + 28,09 / 11)]^{3/2} = 0,22$$

5. Нормирующие множители для энергии и пробега

$$F = \frac{6,9 \cdot 10^6 a M_2}{Z_1 Z_2 (M_1 + M_2)} = \frac{6,9 \cdot 10^6 \cdot 1,59 \cdot 10^{-9} \cdot 28,09}{5 \cdot 14 (11 + 28,09)} = 1,125 \cdot 10^{-4} \text{ эВ},$$

$$L = \pi a^2 \gamma N_2 = 3,14 (1,59 \cdot 10^{-9})^2 0,81 \cdot 4,98 \cdot 10^{22} = 3,19 \cdot 10^5 \text{ см}.$$

6. Безразмерные энергии

$$\varepsilon = EF = 10^5 \cdot 1,125 \cdot 10^{-4} = 11,25;$$

$$\beta = 6,16 \cdot 10^3 Z_2 M_1 F = 6,16 \cdot 10^3 \cdot 14 \cdot 11 \cdot 1,125 \cdot 10^{-4} = 107.$$

7. Рассчитаем полный пробег в безразмерных единицах:

$$\rho = \frac{2}{k} \varepsilon^{1/2} \left(1 + \frac{\varepsilon k}{3\beta} \right) - \frac{2c/k}{k\sqrt{c/k+d}} \arctg \left(\sqrt{\frac{\varepsilon}{c/k+d}} \right).$$

Вначале вычислим отдельные множители:

$$c/k = 0,45/0,22 = 2,05, \quad c/k+d = 2,05+0,3 = 2,35,$$

$$\sqrt{c/k+d} = \sqrt{2,35} = 1,53, \quad \frac{2c/k}{k\sqrt{c/k+d}} = \frac{2 \cdot 2,05}{0,22 \cdot 1,53} = 12,2.$$

Подставим числовые значения:

$$\rho = \frac{2}{0,22} \sqrt{11,25} \left(1 + \frac{0,22 \cdot 11,25}{3 \cdot 107} \right) - 12,2 \arctg \frac{\sqrt{11,25}}{1,53} = 16,2.$$

8. Выразим пробег в размерных единицах:

$$R = \rho / L = 16,2 / (3,19 \cdot 10^5) = 5,0 \cdot 10^{-5} \text{ см} = 0,50 \text{ мкм}.$$

Средний нормальный пробег и стандартное отклонение пробега.

Средний нормальный пробег связан со средним полным пробегом:

$$R_p = fR. \quad (9)$$

Корректирующая поправка, обусловленная упругим рассеянием иона,

$$f = \left(1 + \frac{1}{3} \frac{M_2}{M_1} \sqrt{\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon}} \right)^{-1}, \quad (10)$$

где полная энергия, затраченная на упругое рассеяние иона,

$$\varepsilon_n = \frac{c}{k} \ln \left(1 + \frac{\varepsilon}{c/k+d} \right). \quad (11)$$

Взаимодействие иона с атомами мишени носит случайный характер. Моноэнергетический пучок ионов после прохождения некоторого слоя вещества приобретает дисперсию по энергиям. В результате часть ионов проходит половину своего пути без заметных потерь энергии и проникает на глубину, превышающую R_p , а часть ионов испытывает более сильное

торможение и останавливается, не дойдя до R_p . Стандартное среднеквадратичное отклонение нормального пробега

$$\Delta R_p = R_p \sqrt{\frac{\rho}{9\varepsilon} (\gamma + \mu) S_n(\varepsilon)}, \quad (12)$$

$$\mu = M_2 / M_1 \quad (13)$$

Ядерная тормозная способность $S_n(\varepsilon)$:

$$\text{при } \varepsilon \leq 10 \quad S_n(\varepsilon) = c\varepsilon^{1/2} / (d + \varepsilon), \quad (14)$$

$$\text{при } \varepsilon > 10 \quad S_n(\varepsilon) = (2\varepsilon)^{-1} \ln(1,29\varepsilon), \quad (15)$$

где $c=0,45$, $d=0,3$.

Пример 2. Рассчитать R_p и ΔR_p ионов $^{11}\text{B}^+$ с энергией 100 кэВ в кремнии.

1. Используя данные примера 1, найдем потери энергии на ядерное торможение:

$$\varepsilon_n = \frac{c}{k} \ln \left(1 + \frac{\varepsilon}{c/k + d} \right) = 2,05 \cdot 2,3 \lg \left(1 + \frac{11,25}{2,35} \right) = 3,63.$$

2. Рассчитаем поправку:

$$f = \left(1 + \frac{1}{2} \frac{M_2}{M_1} \sqrt{\frac{\varepsilon_n}{\varepsilon}} \right)^{-1} = \left(1 + \frac{1}{3} \frac{28,09}{11} \sqrt{\frac{3,63}{11,25}} \right)^{-1} = 0,674.$$

3. Для $\varepsilon > 10$ определим тормозную способность:

$$S_n(\varepsilon) = (2\varepsilon)^{-1} \ln 1,29\varepsilon = (2 \cdot 11,25)^{-1} 2,3 \lg 1,29 \cdot 11,25 = 0,119.$$

4. Отношение масс сталкивающихся частиц

$$\mu = M_2 / M_1 = 28,09 / 11 = 2,55.$$

5. Средний нормальный пробег

$$R_p = fR = 0,674 \cdot 0,5 = 0,337 \text{ мкм}.$$

6. Среднеквадратичное отклонение пробега

$$\Delta R_p = R_p \sqrt{\frac{\rho}{9\varepsilon} (\gamma + \mu) S_n(\varepsilon)} = 0,337 \sqrt{\frac{16,2}{9 \cdot 11,25} (0,81 + 2,55) 0,119} = 0,089 \text{ мкм}.$$

Пробег в многокомпонентных веществах. Для оценки пробегов, не требующей очень высокой точности, многокомпонентное вещество представляют в виде гипотетического однокомпонентного, состоящего из атомов с эффективными зарядом ядра и массой:

$$Z_{2\phi} = \frac{\sum_{i=A,B,\dots} x_i Z_i}{\sum_{i=A,B,\dots} x_i}, \quad M_{2\phi} = \frac{\sum_{i=A,B,\dots} x_i M_i}{\sum_{i=A,B,\dots} x_i}$$

где Z_i и M_i — атомные номера и массы элементов, входящих в состав соединения; x_i — количество атомов элемента в молекуле соединения. Например, для GaAs $x_{\text{Ga}} = 1$, $x_{\text{As}} = 1$; для $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ $x_{\text{Gd}} = 3$, $x_{\text{Ga}} = 5$, $x_{\text{O}} = 12$, $\sum_i x_i = 20$.

Собственная концентрация атомов такого соединения определяется с помощью эффективной массы при известной плотности реального вещества:

$$N_2 = \frac{N_A d}{\mu_{2эф}} = 6,023 \cdot 10^{23} \frac{d}{\mu_{2эф}} \text{ ат / см}^3,$$

где $\mu_{2эф}$ — молекулярная масса, г/моль.

Отметим, что N_2 точно равно истинной концентрации всех атомов данного многокомпонентного соединения. По этой же формуле рассчитывают значения N_2 для элементарных веществ, заменяя эффективную массу реальной молекулярной массой.

В табл. 1 даны значения средних нормальных пробегов и стандартных отклонений пробегов, выраженные в нанометрах, для ряда ионов с энергиями 20—200 кэВ в кремнии, рассчитанные на ЭВМ.

Распределение пробегов ионов. Профили распределения концентрации внедренных ионов определяются характером распределения средних нормальных пробегов по глубине облученного слоя. Расчеты пробегов ионов были выполнены для случая, когда атомы в кристалле распределены нерегулярно, что присуще аморфным и поликристаллическим веществам. Пучок ионов, попадая в такие вещества, испытывает случайные столкновения с атомами, и распределение пробегов описывается законом распределения случайной величины. Аналогичная ситуация наблюдается в монокристаллах, если ионный пучок падает на произвольно ориентированную поверхность пластины относительно кристаллографических направлений с малыми, индексами, например вдоль оси $\langle 763 \rangle$. Такое внедрение называют неориентированным. В этом случае профиль распределения внедренных атомов описывается, как и для аморфных веществ, кривой Гаусса:

$$C(x) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - R_p}{\Delta R_p} \right)^2 \right]. \quad (16)$$

Максимум концентрации примеси в отличие от случая введения ее методом диффузии залегает не на поверхности, а на глубине $x = R_p$:

$$C_{\max} = 0,4N / \Delta R_p.$$

Отношение концентраций на глубинах $R_p \pm \Delta R_p$ к максимальной

$$C(R_p \pm \Delta R_p) / C_{\max} = 1/\sqrt{e} = 0,607,$$

что используют для определения дисперсии пробегов (стандартного отклонения) по экспериментально полученным профилям распределения. Некоторые характерные точки кривой Гаусса представлены в табл. 2.

Имея в виду, что $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, а Q имеет размерность мкКл/см², доза облучения (ион/см²)

$$N = 6,25 \cdot 10^{12} Q / n.$$

Метод ионной имплантации является основным в планарной технологии, сочетающей загонку примеси в виде дозированного количества ионов и диффузионную разгонку. Совмещение ионной имплантации с планарной технологией облегчается применением тех же легирующих примесей и веществ

для их получения, что и при диффузии; использованием тех же материалов для маскирования при таких же толщинах, что никак не влияет на процесс литографии; возможностью управления дозами облучения в очень широких пределах (от 10^{10} до 10^{17} см⁻²) при высокой производительности.

Основные преимущества метода ионной имплантации, на которых базируется его использование в серийном производстве, состоят в точном контроле полного количества внедренной примеси и высокой однородности легирования по поверхности пластины. Неоднородность в распределении плотности внедренной примеси по пластине составляет 1% или менее при воспроизводимости результатов от процесса к процессу в пределах 2%. Точность контроля на большинстве технологических операций полупроводникового производства не достигает 1—3% и колеблется в пределах 5—10%. Даже в исходных кремниевых пластинах разброс по концентрации легирующей примеси доходит до 5%. По этой причине типичная концентрация внедренной с помощью ионной имплантации примесь должна на порядок превышать исходный уровень легирования кремниевой пластины. Резко выраженная перекомпенсация или перелегирование (для однотипных по электропроводности примесей) является необходимым условием получения точности, присущей методу ионной имплантации.

80	R_p	665	266	228	99	74
	ΔR_p	121	60	57	2Q	11,5.
00	R_p	725	297	254	no	81
	ΔR_p	1 126	1 70	1 61	22	12,5
0	ΔR_p	32	11	9,4	3,7	2,4
0	R_p	161	56 '	49	27	23
	ΔR_p	54.	19	16,4	6,2	3,8
0	R_p	244	85	73	38	31
	ΔR_p	71	27	23	8,4	5,1
0	R_p	324	114	98	48	38
	ΔR_p	84	1 35	30	10,5	6,3
00	R_p	398	144	123	58	46
	ΔR_p	94	42	1 35	12,5	7,4
20	R_p	469	175	149	68	53
	ΔR_p	102	48	41	14,5	8,4
40	R_p	537	205	175	79	60
	ΔR_p	110	54	47	16	9,5
60	R_p	603	236	201	89	67 .
	ΔR_p	116	60	52	18	10,5

Таблица 2.

$\pm \frac{x - R_p}{\sqrt{2\Delta R_p}}$	0	0,83 3	1,52	2,14	2,63	3,04	3,39	3,71	4,0
$\frac{C(x)}{C_{\max}}$	1	0,5	0,1	0,01	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}

2. Отжиг и диффузия

Отжиг ионно-имплантированных слоев. В технологической практике получили применение две группы процессов ионной имплантации: имплантация как стадия загонки примеси для последующей диффузионной разгонки с целью реализации необходимой структуры и имплантация для непосредственного создания структуры без диффузионного перемещения внедренного примесного распределения. Во втором случае после имплантации производят отжиг, задача которого — устранить радиационные нарушения и обеспечить электрическую активацию внедренных атомов. Большая часть радиационных дефектов кристаллической решетки, возникающих в кремнии при имплантации, отжигается при $T < 600^\circ\text{C}$. Можно выделить два режима отжига, при каждом из которых исчезает половина имеющихся нарушений. Если дозы облучения были малы и отдельные кластеры нарушений не перекрываются, то восстановление кристаллической структуры кремния происходит при $T \leq 260^\circ\text{C}$. В случае больших доз облучения образуется сплошной аморфный слой, для рекристаллизации которого необходимы температуры $T \geq 570^\circ\text{C}$. Отжиг при первом режиме сопровождается освобождением вакансий из кластеров с образованием новых дефектов (ассоциаций вакансий, комплексов вакансия — примесь) и их распадом. Отжиг при втором режиме — эпитаксиальная рекристаллизация аморфизированного слоя, причем роль затравки играет лежащая под ним монокристаллическая пластина.

Граница между понятиями «отжиг» и «диффузия» для ионно-имплантированных слоев кремния лежит вблизи 1000°C . При $T < 1000^\circ\text{C}$ диффузионными процессами можно пренебречь. Переход внедренных атомов в узлы кристаллической решетки, где они проявляют донорные или акцепторные свойства, для большинства легирующих примесей начинается при температурах свыше 300°C . При $T = 400\text{—}500^\circ\text{C}$ присутствие кластеров и неполное восстановление решетки определяют низкое значение подвижности носителей заряда и сильную температурную зависимость концентрации доноров и

акцепторов в слое. При внедрении B , Al , P подвижность носителей заряда меньше, чем в некомпенсированных материалах с такими же концентрациями примесей. После отжига при 500°C , несмотря на распад большей части кластеров нарушений, в слое еще остаются компенсирующие дефекты и центры с глубокими уровнями, что слабо сказывается на подвижности, но заметно уменьшает концентрацию носителей заряда.. Если внедрение проведено большими дозами при таких условиях, что облученная область стала аморфной, то в диапазоне температур отжига $500\text{—}650^{\circ}\text{C}$ происходит резкое возрастание количества носителей заряда. Эта стадия электрической активации примесей совпадает с отжигом аморфизированного слоя и объясняется его эпитаксиальной рекристаллизацией, в процессе которой имеется высокая вероятность замещения вакантных узлов решетки атомами примеси.

Об электрической активности легированного слоя судят после отжига по значению эффективной поверхностной концентрации носителей заряда N_s , характеризующему количество носителей заряда в слое под единицей площади поверхности. Если каждый внедренный ион становится после отжига электрически активным, т. е. образует дырку или электрон проводимости, то доза облучения $N=N_s$. Обычно $N>N_s$.

Диффузия примеси из ионно-имплантированного слоя. Одним из наиболее распространенных приемов в современной технологии является сочетание ионной имплантации и диффузии. Ионная имплантация используется для предварительной загонки строго фиксированного количества примеси с высокой воспроизводимостью от процесса к процессу и высокой однородностью распределения по поверхности облучаемых пластин. Диффузия служит для последующей разгонки внедренной примеси с целью обеспечения нужного профиля распределения атомов с требуемой глубиной залегания р-п-перехода и концентрацией носителей заряда. Наибольший эффект дает применение ионной имплантации при создании слаболегированных областей: баз транзисторов, элементов резисторов и др.

Диффузия примесей из ионно-легированного слоя для низких доз облучения $Q\leq 10^2$ мкКл/см² идет как из источника с ограниченным содержанием примеси. В этом уравнении следует учесть наличие предварительного распределения

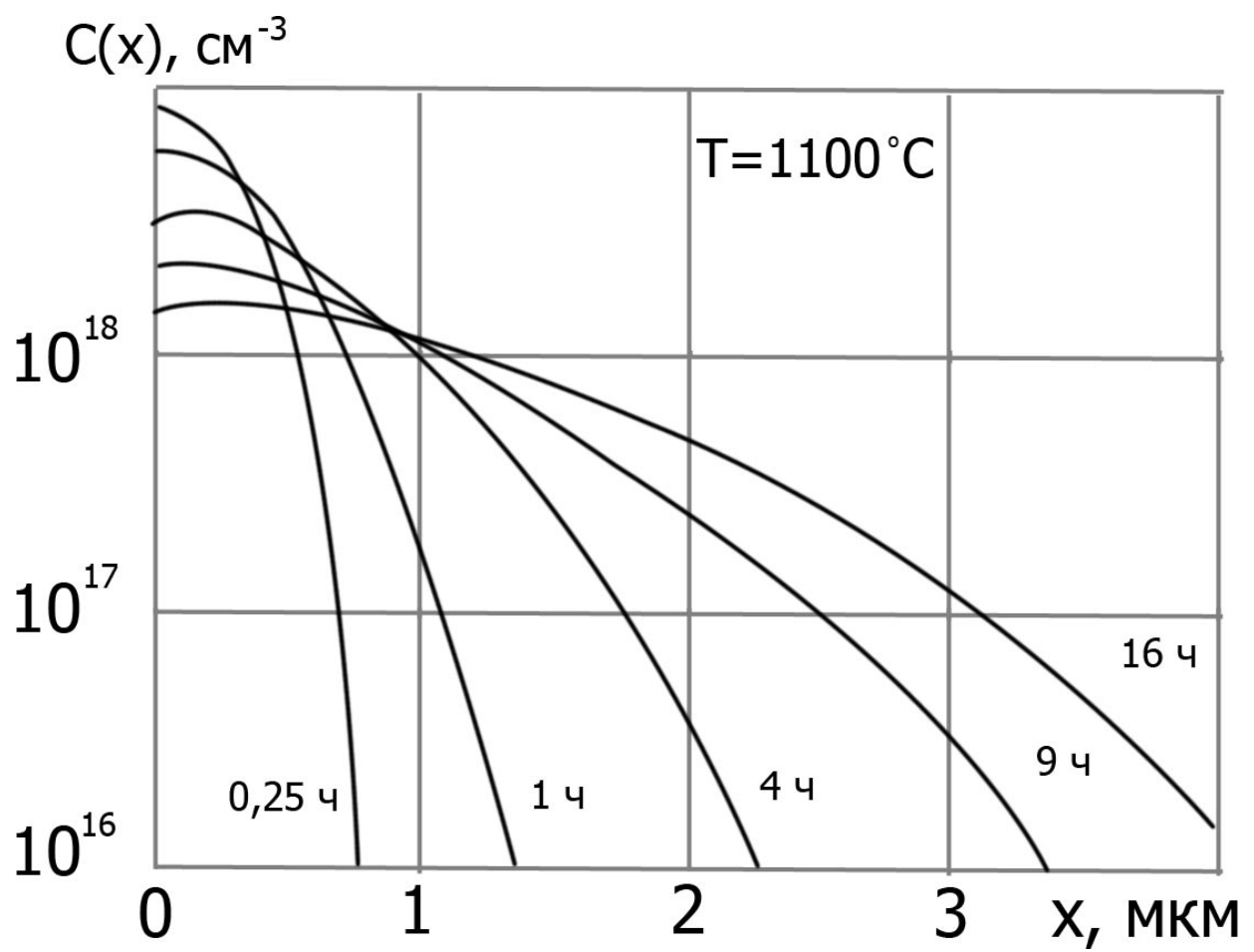


Рис. 2. Профили распределения B в Si после разгонки

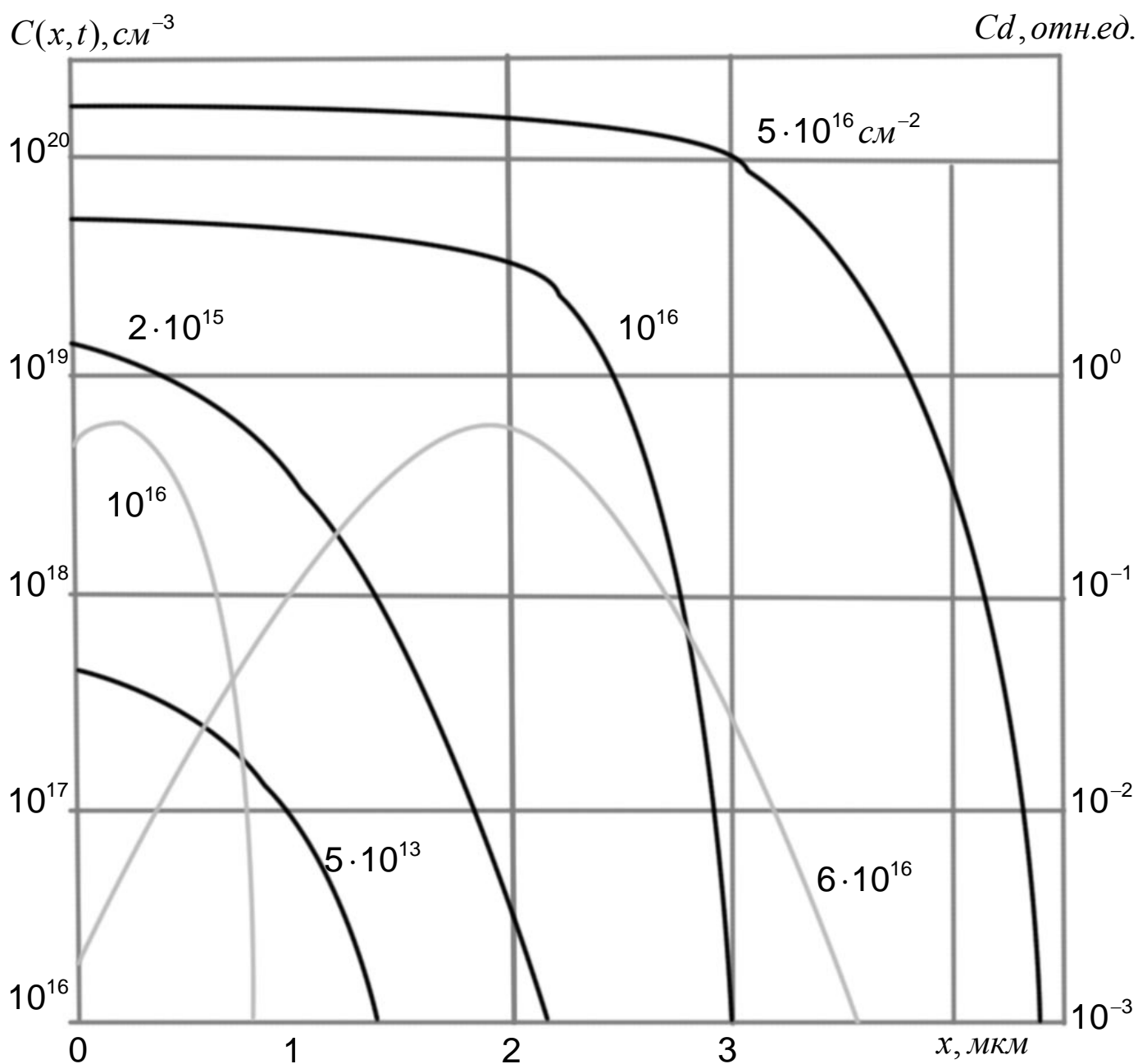


Рис. 3. Профили распределения фосфора C_x и дислокаций C_d в Si

примеси, созданного имплантацией. Комбинированное распределение можно представить в виде

$$C(x,t) = \frac{N}{\sqrt{\pi}(\sqrt{2}\Delta R_p + \sqrt{Dt})} \exp \left[- \left(\frac{x - R_p}{\sqrt{2}\Delta R_p + 2\sqrt{Dt}} \right)^2 \right]. \quad (23)$$

Сразу после имплантации, а также после низкотемпературного отжига $\sqrt{Dt} \ll \Delta R_p$ и распределение (23) соответствует кривой (16). После диффузионной разгонки при высокой температуре $\sqrt{Dt} \gg \Delta R_p$, $\Delta R_p \ll x$ и

распределение (23) подобно диффузионному (1). Если $\sqrt{Dt} \approx \Delta R_p$, то распределение примеси следует строить согласно кривой (23).

На рис.2 приведены профили распределения концентрации бора, полученные после разгонки при 1100°C в течение 0,25—16 ч в атмосфере аргона. Имплантация бора производилась с дозой $N=3 \cdot 10^{14}$ см⁻² и энергией $E=30$ кэВ. Коэффициент диффузии после различных длительностей разгонки соответствует данным, известным для обычной диффузии при малых концентрациях примеси. Между глубиной залегания p-n-перехода и длительностью разгонки с учетом начального залегания перехода существует зависимость, справедливая при постоянном коэффициенте диффузии.

Соотношение (2) раздела диффузии нарушается при диффузии из слоев, образованных при больших дозах облучения. На рис.3 сплошными линиями показаны профили фосфора, внедренного с энергией 40 кэВ и дозами от $5 \cdot 10^{13}$ до $6 \cdot 10^{16}$ см⁻² в кремний после разгонки в осушенном азоте при 1150°C в течение 1,5 ч. Если вычислить отношение глубин p-n-переходов и значений $\sqrt{\lg N}$, которым должны быть прямо пропорциональны эти глубины согласно уравнению (2) раздела диффузии, то окажется, что глубина перехода возрастает более стремительно с ростом дозы облучения, чем это следует из теоретических соотношений для обычной диффузии. Форма профилей распределения — сравнительно слабый спад концентрации в приповерхностной зоне и более резкий — в глубине слоя — свидетельствует об интенсификации процесса диффузии примеси. Ускоряющими факторами являются высокая концентрация примеси и наличие большого числа радиационных дефектов, распад которых при нагреве сопровождается появлением потока избыточных вакансий. Ступенчатая форма профилей при дозах свыше 10^{16} см⁻² характерна для обычной диффузии и обусловлена образованием дислокаций несоответствия в области легирования. Распределение дислокационных сеток по глубине в относительных единицах показано на рис. 3 пунктирными линиями для двух наибольших доз. Глубина распространения сеток дислокаций меньше глубины диффузии. Более глубокая диффузия при больших дозах облучения связана с появлением потока неравновесных вакансий и взаимодействием дислокаций и их диффузией за область дислокационной сетки. Разделить эти эффекты практически невозможно.

3. Методы расчетов ионно-имплантированных структур

При технологических расчетах ионно-имплантированных структур, как и в случае диффузии, встречаются прямые и обратные задачи. Типичным примером прямой задачи является построение профиля распределения концентраций для заданных ионов, энергии и дозы облучения. Профиль распределения описывается выражением (16), и его построение основывается на определении R_p и ΔR_p по таблице или расчетным путем. Более сложным является построение профиля для транзисторной структуры, требующей двукратной имплантации.

Расчет профилей распределения концентрации внедренных примесей в структурах с двойной имплантацией. Для создания транзистора типа $n-p-n$ в эпитаксиальный слой с электропроводностью n -типа производят последовательную имплантацию ионов акцепторной примеси с энергией E_a и дозой N_a для формирования базовой области и ионов донорной примеси с энергией E_d и дозой N_d для формирования эмиттера, причем $R_{pa} > R_{pd}$ а $C_{\max a} < C_{\max d}$. Суммарное распределение примеси описывается выражением

$$C(x) = C_{\max a} \exp \left[- \left\langle (x - R_{pa}) / (\sqrt{2} \Delta R_{pa}) \right\rangle^2 \right] - C_{\max d} \exp \left[- \left\langle (x - R_{pd}) / (\sqrt{2} \Delta R_{pd}) \right\rangle^2 \right] - C_B. \quad (24)$$

Глубину залегания коллекторного перехода определяем из условия

$$C_{\max a} \exp \left[- \left(\frac{x_{jk} - R_{pd}}{\sqrt{2} \Delta R_{pd}} \right)^2 \right] - C_B = 0,$$

откуда

$$x_{jk} = R_{pd} + \Delta R_{pa} \sqrt{2 \ln(C_{\max a} / C_B)}, \quad (25)$$

где

$$C_{\max a} = \frac{N_a}{\sqrt{2\pi} \Delta R_{pa}}.$$

Глубину залегания эмиттерного перехода с учетом того, что $C(x_{jэ}) \gg C_B$, определяем из условия

$$C_{\max a} \exp \left[- \left(\frac{x_{jэ} - R_{pa}}{\sqrt{2} \Delta R_{pa}} \right)^2 \right] = C_{\max d} \exp \left[- \left(\frac{x_{jэ} - R_{pd}}{\sqrt{2} \Delta R_{pd}} \right)^2 \right],$$

откуда

$$x_{jэ} = \left(-m + \sqrt{m^2 - ac} \right) / a \quad (26)$$

где

$$a = \Delta R_{pd}^2 - \Delta R_{pa}^2,$$

$$m = -R_{pa} \Delta R_{pd}^2 + R_{pd} \Delta R_{pa}^2,$$

$$c = R_{pa}^2 \Delta R_{pd}^2 - R_{pd}^2 \Delta R_{pa}^2 - 2 \Delta R_{pa}^2 \Delta R_{pd}^2 \ln \frac{N_a \Delta R_{pd}}{N_d \Delta R_{pa}}.$$

Для ориентировочного расчета более просто глубину залегания эмиттерного перехода можно оценить, исходя из равенства $C(x_{jэ}) = C_B$, т.е.

$$x_{jэ} \approx R_{pd} + \Delta R_{pd} \sqrt{2 \ln(C_{\max d} / C_B)}. \quad (27)$$

Толщина базовой области $\omega \approx x_{jk} - x_{jэ}$.

Пример 3. Рассчитать профиль распределения концентрации примеси в транзисторной структуре, образованной имплантацией $^{11}\text{B}^+$ и $^{31}\text{P}^+$ в кремний с электропроводностью n -типа, если $C_B = 10^{16} \text{ см}^{-3}$, $E_a = 100 \text{ кэВ}$, $N_a = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $E_d = 200 \text{ кэВ}$, $N_d = 1 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Из табл. 10.1 определим, что для ионов бора с энергией 100 кэВ $R_{pa}=0,398$ мкм, $\Delta R_{pa}=0,094$ мкм, а для ионов фосфора с энергией 200 кэВ $R_{pd}=0,254$ мкм, $\Delta R_{pd}=0,061$ мкм.

Найдем максимальные концентрации бора и фосфора:

$$C_{\max a} = \frac{0,4N_a}{\Delta R_{pa}} = \frac{0,4 \cdot 5 \cdot 10^{13}}{0,094 \cdot 10^{-4}} = 2,12 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3},$$

$$C_{\max d} = \frac{0,4N_d}{\Delta R_{pd}} = \frac{0,4 \cdot 1 \cdot 10^{15}}{0,061 \cdot 10^{-4}} = 6,55 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}.$$

3. Найдем глубины залегания коллекторного и эмиттерного p - n -переходов:

$$x_{jk} = R_{pa} + \Delta R_{pa} \sqrt{2 \ln \frac{C_{\max a}}{C_B}} = 0,398 + 0,094 \sqrt{4,6 \lg \frac{2,12 \cdot 10^{18}}{1 \cdot 10^{16}}} = 0,705 \text{ мкм},$$

$$x_{jэ} = R_{pd} + \Delta R_{pd} \sqrt{2 \ln \frac{C_{\max d}}{C_B}} = 0,254 + 0,061 \sqrt{4,6 \lg \frac{6,55 \cdot 10^{19}}{1 \cdot 10^{16}}} = 0,510 \text{ мкм}.$$

4. Пользуясь выражением (24), построим суммарное распределение акцепторной и донорной примесей в структуре n - p - n -транзистора, показанное сплошной линией на рис.4. Там же показаны отдельно распределения внедренных атомов бора $C_b(x)$ и фосфора $C_\phi(x)$. Можно видеть, что простая формула для определения положения эмиттерного перехода имеет достаточную точность.

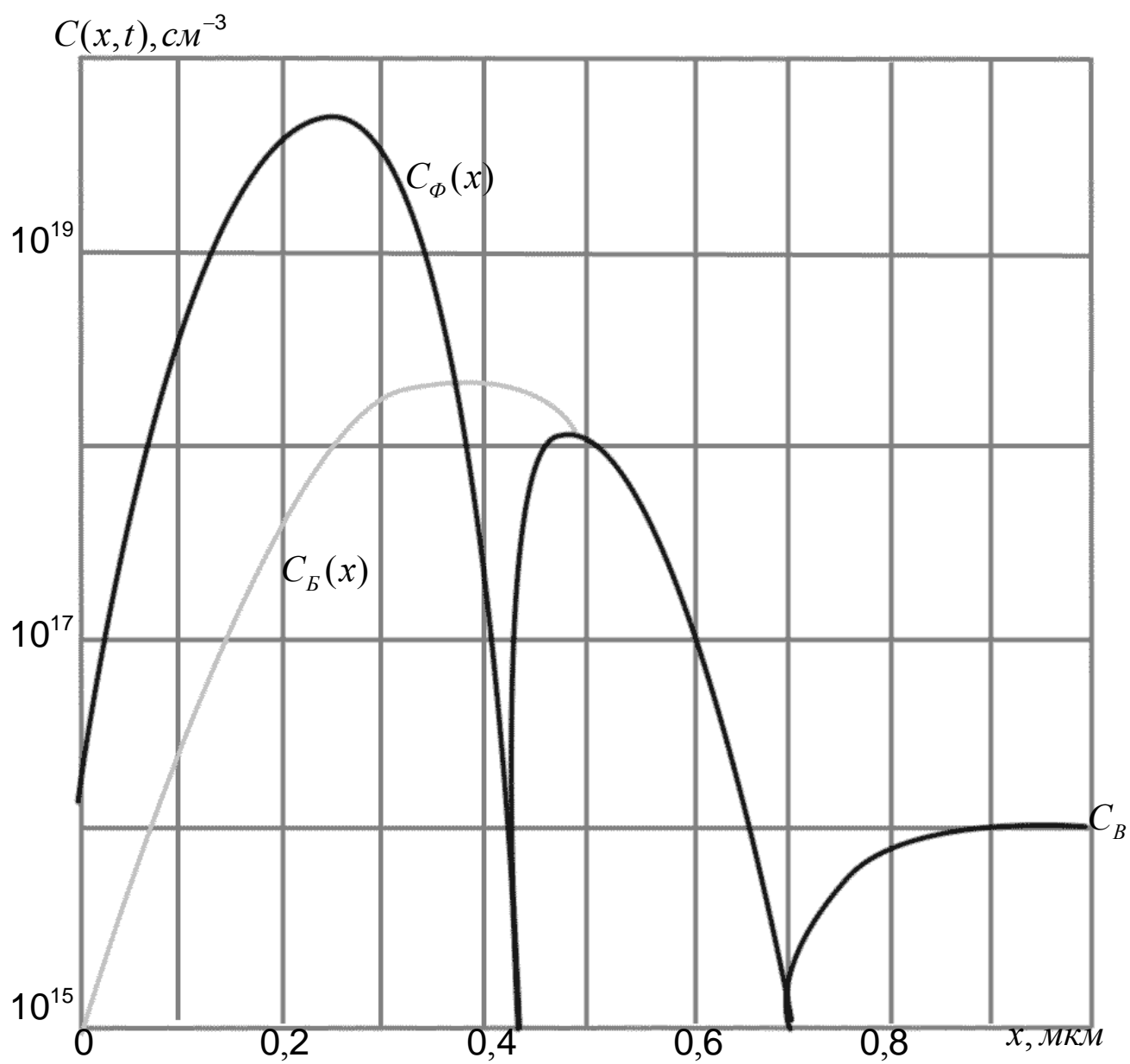


Рис.4. Распределение бора и фосфора в n - p - n -транзисторе

Расчет распределения концентрации примеси в двухслойных структурах. Для создания МОП-структур часто применяют имплантацию примесей в кремний через пленку диоксида. На границе раздела $\text{SiO}_2\text{—Si}$ вследствие различия в тормозных способностях кремния и диоксида концентрация примеси изменяется скачком. Для теоретического построения профилей в двухслойных структурах имеется сравнительно простой прием. Пусть нам известны порознь профили распределения ионов в каждом из компонентов структуры SiO_2 и Si , облученных с дозой N . На профиле в SiO_2 проведем сечение на глубине d_1 равной толщине интересующей нас оксидной пленки. Обозначим количество атомов, лежащих слева и справа от этого сечения, N_1 и N_2 соответственно. На профиле в Si проведем такое же сечение на глубине d_2 так, чтобы $N'_1 = N_1$ и $N'_2 = N_2$. Составив теперь части профилей N_1 и N'_2 , получим искомое распределение в двухслойной структуре Si—SiO_2 . Аналитическим путем это распределение может быть построено, если известны значения пробегов и их стандартных отклонений R_{p1} и ΔR_{p1} в SiO_2 , R_{p2} и ΔR_{p2} в Si . Для построения профилей распределения концентрации внедренной примеси в кремнии необходимо определить дозу ионов N_1 , тормозящихся в пленке диоксида на участке от $x=0$ до $x=d_1$:

$$N_1 = \int_0^{d_1} C(x) dx = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\Delta R_{p1}} \int_0^{d_1} \exp\left[-\left(\frac{x - R_{p1}}{\sqrt{2}\Delta R_{p1}}\right)^2\right] dx = \frac{N}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2}\Delta R_{p1}}\right) \quad (28)$$

Очевидно, что доза ионов примеси, прошедших через оксид в кремний, $N_2 = N - N_1$

При отсутствии пленки диоксида доза ионов $N'_1 = N_1$ будет содержаться в кремнии на глубине от $x=0$ до $x=d_2$

$$N'_1 = \frac{N}{\sqrt{2\pi}\Delta R_{p2}} \int_0^{d_2} \exp\left[-\left(\frac{x - R_{p2}}{\sqrt{2}\Delta R_{p2}}\right)^2\right] dx = \frac{N}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{d_2 - R_{p2}}{\sqrt{2}\Delta R_{p2}}\right) \quad (29)$$

Приравняв (28) и (29), получим

$$\operatorname{erf} \frac{d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2}\Delta R_{p1}} = \operatorname{erf} \frac{d_2 - R_{p2}}{\sqrt{2}\Delta R_{p2}}.$$

Условием равенства erf-функций является равенство их аргументов, поэтому

$$\frac{d_1 - R_{p1}}{\sqrt{2}\Delta R_{p1}} = \frac{d_2 - R_{p2}}{\sqrt{2}\Delta R_{p2}} \quad (30)$$

Отсюда находим толщину эквивалентного слоя кремния, в котором тормозится доза ионов $N'_1=N_1$:

$$d_2 = R_{p2} + (d_1 - R_{p1}) \frac{\Delta R_{p2}}{\Delta R_{p1}} \quad (31)$$

При построении распределения внедренной примеси в кремнии начало координат помещают на поверхности кремния, поэтому профиль распределения описывается гауссианой вида

$$C(x) = \frac{0,4N}{\sqrt{2\pi}\Delta R_{p2}} \exp \left[- \left(\frac{x + d_2 - R_{p2}}{\sqrt{2}\Delta R_{p2}} \right)^2 \right] \quad (32)$$

Пример 4. Построить распределение концентрации ионов бора в кремнии, внедренных с энергией 40 кэВ и дозой облучения $6,2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ через пленку диоксида толщиной $d_1 = 0,2 \text{ мкм}$.

Из данных табл. 10.1 для кремния и табл.3 для диоксида кремния определим, что $R_{p1}=0,142 \text{ мкм}$, $\Delta R_{p1}=0,04 \text{ мкм}$, $R_{p2}=0,161 \text{ мкм}$, $\Delta R_{p2}=0,054 \text{ мкм}$.

По формуле (31) найдем толщину эквивалентного слоя кремния:

$$d_2 = 0,161 + (0,2 - 0,142) \frac{0,054}{0,040} = 0,239 \text{ мкм}.$$

3. Запишем расчетные формулы для профилей распределения бора в кремнии

$$C(x) = \frac{0,4 \cdot 6,2 \cdot 10^{13}}{0,054 \cdot 10^{-4}} \exp \left[- \left(\frac{x + 0,239 - 0,161}{\sqrt{2} \cdot 0,054} \right)^2 \right] = 4,6 \cdot 10^{18} \exp \left[- \left(\frac{x + 0,078}{0,0765} \right)^2 \right],$$

в диоксиде кремния

$$C(x) = \frac{0,4 \cdot 6,2 \cdot 10^{13}}{0,04 \cdot 10^{-4}} \exp \left[- \left(\frac{x - 0,142}{\sqrt{2} \cdot 0,04} \right)^2 \right] = 6,2 \cdot 10^{18} \exp \left[- \left(\frac{x - 0,142}{0,0566} \right)^2 \right].$$

4. Согласно расчетным формулам построим профили распределения бора в двухслойной структуре (рис.5).

5. С помощью формулы (28) найдем дозу ионов бора, остающегося в пленке диоксида:

$$N_1 = \frac{6,2 \cdot 10^{13}}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \frac{0,2 - 0,142}{\sqrt{2} \cdot 0,04} \right) = 5,75 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}.$$

6. Доза ионов бора, прошедшего в кремний,

$$N_2 = N - N_1 = 6,2 \cdot 10^{13} - 5,75 \cdot 10^{13} = 4,5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}.$$

т. е. в кремний прошло менее 0,1 от полной дозы облучения.

M_1	E , кэВ	R_p , нм	ΔR_p , нм
^{11}B	20	69	24
	40	142	40
	100	339	67
	140	453	78
^{75}As	40	35	12,5
	80	52	18

	150	83	29
--	-----	----	----

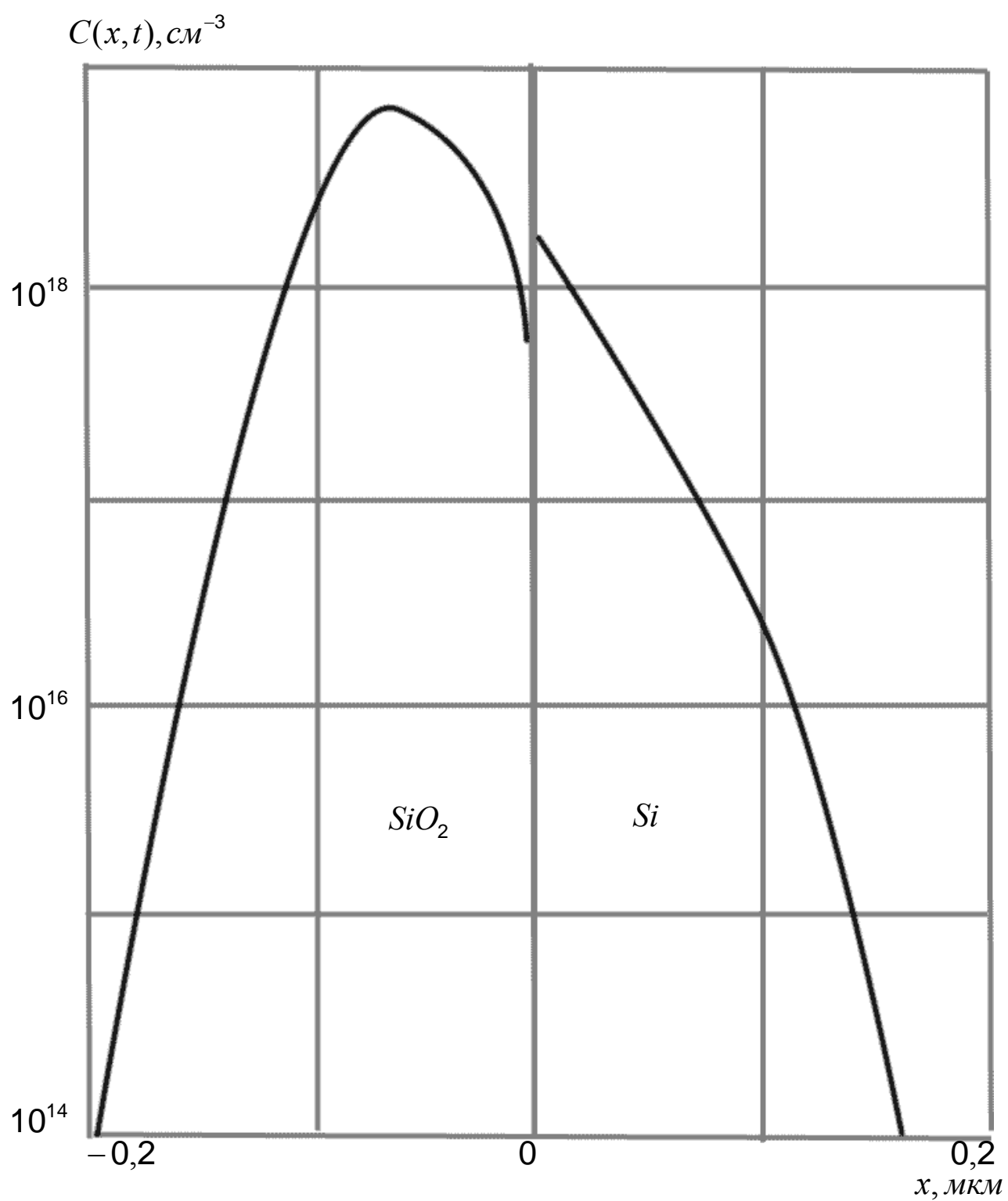


Рис. 5. Распределение бора в структуре SiO_2 - Si

Расчет распределения концентрации примеси в случае распыления части ионно-имплантированного слоя. Распыление полупроводника, облучаемого ускоренными ионами, может привести к тому, что профили распределения будут сильно отличаться от кривой Гаусса, а общее количество оставшихся в кристалле ионов станет много меньше дозы облучения. Распределение внедренных ионов в момент времени t в процессе имплантации выражается гауссианой вида

$$C(x) = \frac{Idt}{\sqrt{2\pi}\Delta R_p} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x - R_p + vt}{\Delta R_p}\right)^2\right],$$

где I — интенсивность потока ионов, ион/(см²*с); $Idt=dN$ — доза, набираемая за период dt , ион/см²; $v=dx/dt$ — скорость распыления кристалла, см/с.

Интегрируя это выражение по времени, найдем профиль распределения ионов в момент $t=T$, к которому толщина распыленного слоя составит $\Delta x=vT$:

$$C(x) = \frac{N}{2\Delta x} \left[\operatorname{erf} \frac{x - R_p + \Delta x}{\sqrt{2}\Delta R_p} - \operatorname{erf} \frac{x - R_p}{\sqrt{2}\Delta R_p} \right].$$

Толщину распыленного слоя удобно выразить, используя коэффициент распыления K :

$$\Delta x = KN / N_2.$$

Тогда профиль распределения ионов, остающихся в кристалле,

$$C(x) = \frac{N_2}{2K} \left[\operatorname{erf} \frac{x - R_p + \Delta x}{\sqrt{2}\Delta R_p} - \operatorname{erf} \frac{x - R_p}{\sqrt{2}\Delta R_p} \right].$$

Явление распыления приводит к насыщению количества атомов примеси, остающихся в полупроводнике на уровне $N_{R \max}$ которое рассчитывают по формуле

$$N_{R \max} \approx N_2 R_p / K.$$

С ростом энергии ионов возрастает пробег, что ведет к увеличению толщины легированного слоя, меньшему влиянию распыления и возрастанию $N_{R \max}$. Этому же способствует снижение K . Таким образом, явление распыления следует учитывать при малых R_p и больших K .

5. Определение режимов имплантации

Мы рассмотрели решения ряда наиболее часто встречающихся на практике прямых задач по расчету ионно-имплантированных структур. Обратные задачи более сложны. Обычно они заключаются в определении энергии, необходимой для получения заданного среднего нормального пробега ионов, или в определении дозы облучения, требующейся для обеспечения заданной концентрации примеси.

Расчет энергии ионов, необходимой для получения заданного пробега. Соотношение пробег — энергия, описываемое формулой (10.2), не позволяет путем простого преобразования выразить зависимость энергии от пробега. Для многих случаев $k\varepsilon \ll 3\beta$, поэтому, используя разложение в ряд функции $\operatorname{arctg} x$, можно упростить формулу (10.2):

$$\rho = \frac{2}{k} \varepsilon^{1/2} \left[1 + \frac{1}{1 + kd/c} \left(1 - \frac{1}{4} \frac{\varepsilon}{c/k + d} \right) \right] \quad (33)$$

Если соблюдается условие $\varepsilon \leq \frac{c}{k} + d$ что справедливо для большинства практически важных случаев, то $\ln(1+x) \approx x$ и из формул (10) и (11) следует

$$f \approx \left(1 + \frac{\mu}{3} \sqrt{\frac{c/k}{c/k + d}} \right)^{-1} \quad (34)$$

Средний нормальный пробег связан с полным пробегом соотношением $\rho_p = f\rho$.

Подставив в него формулы (33), (34) и решив полученное кубическое уравнение, найдем зависимость энергии иона от его среднего нормального пробега:

$$\varepsilon = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2, \quad (35)$$

где

$$\varepsilon_1 = \sqrt[3]{-q/2 + \sqrt{(q/2)^2 + (p/3)^3}},$$

$$\varepsilon_2 = \sqrt[3]{-q/2 - \sqrt{(q/2)^2 + (p/3)^3}},$$

$$q = -\frac{2k(c/k - d)^2}{c/k} \frac{\rho_p}{f},$$

$$p = \frac{4d(c/k + d)}{c/k}.$$

Пример 5. Определить энергию E , необходимую для того, чтобы средний нормальный пробег ионов фосфора в кремнии составил $R_p = 0,1$ мкм.

1. Для ионов фосфора ($Z_1=15$, $M_1=31$) в кремнии ($Z_2=14$, $M_2=28,09$)

$$\mu = M_2 / M_1 = 0,905,$$

$$a = \frac{4,7 \cdot 10^{-9}}{(Z_1^{2/3} + Z_2^{2/3})^{1/2}} = \frac{4,7 \cdot 10^{-9}}{(15^{2/3} + 14^{2/3})^{1/2}} = 1,36 \cdot 10^{-9} \text{ см},$$

$$\gamma = \frac{4M_1M_2}{(M_1 + M_2)^2} = \frac{4 \cdot 31 \cdot 28,09}{(31 + 28,09)^2} \approx 1,$$

$$F = \frac{6,9 \cdot 10^6 a M_2}{Z_1 Z_2 (M_1 + M_2)} = \frac{6,9 \cdot 10^6 \cdot 1,36 \cdot 10^{-9} \cdot 28,09}{15 \cdot 14 (31 + 28,09)} = 2,12 \cdot 10^{-5} \text{ эВ}^{-1},$$

$$L = \pi a^2 \gamma N_2 = 3,14 (1,36 \cdot 10^{-9})^2 \cdot 4,96 \cdot 10^{22} = 2,86 \cdot 10^5 \text{ см}^{-1},$$

$$k = 2,47 \cdot 10^{11} Z_1^{2/3} \sqrt{Z_2 / M_2} [a(1 + \mu)]^{3/2} = 2,47 \cdot 10^{11} \cdot 15^{2/3} \sqrt{14 / 28,09} [1,36 \cdot 10^{-9} (1 + 0,905)]^{3/2} = 0,139$$

$$c/k = 0,45 / 0,139 = 3,24,$$

$$c/k + d = 3,24 + 0,3 = 3,54,$$

$$f \approx \left(1 + \frac{\mu}{3} \sqrt{\frac{c/k}{c/k+d}}\right)^{-1} = \left(1 + \frac{0,905}{3} \sqrt{\frac{3,24}{2,54}}\right)^{-1} = 0,776,$$

$$\rho_p = R_p L = 0,1 \cdot 10^{-4} \cdot 2,86 \cdot 10^5 = 2,86.$$

2. Найдем значения p и q :

$$p = \frac{4d(c/k+d)}{c/k} = \frac{4 \cdot 0,3 \cdot 3,54}{3,24} = 1,31,$$

$$q = -\frac{2k(c/k-d)^2}{c/k} \frac{\rho_p}{f} = -\frac{2 \cdot 0,139(3,54)^2}{3,24} \frac{2,86}{0,776} = -3,98.$$

3. Определим значения ε_1 и ε_2 . Вначале вычислим квадратный корень:

$$(q/2)^2 + (p/3)^3 = (-3,98/2)^2 + (1,31/3)^3 = 4,04.$$

$$\varepsilon_1 = \sqrt[3]{-q/2 + \sqrt{(q/2)^2 + (p/3)^3}} = \sqrt[3]{1,99 + \sqrt{4,04}} = 1,587,$$

$$\varepsilon_2 = \sqrt[3]{-q/2 - \sqrt{(q/2)^2 + (p/3)^3}} = \sqrt[3]{1,99 - \sqrt{4,04}} = -0,126.$$

4. Определим значение безразмерной приведенной энергии ε , соответствующей заданному пробегу:

$$\varepsilon = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)^2 = (1,587 - 0,126)^2 = 1,85.$$

На основании ее вычислим значение энергии:

$$E = \varepsilon / F = 1,85 / (2,12 \cdot 10^{-5}) = 87 \text{ кэВ}.$$

Эту же задачу можно решить графически при наличии табличных данных о средних нормальных пробегах ионов фосфора в кремнии в интересующем нас диапазоне энергий. Пользуясь этими данными, построим зависимость $R_p(E)$ и по графику для заданного R_p найдем E . Существует ряд изданий, где дискретные значения пробегов табулированы через 10—20 кэВ для многих сочетаний ион — мишень.

Расчет дозы облучения, необходимой для получения заданной концентрации примеси. Так как профиль распределения концентрации внедренной примеси описывается кривой Гаусса, то для ее построения необходимо знать средний нормальный пробег R_p , среднеквадратичное отклонение пробега ΔR_p и дозу облучения N . Обычно все три параметра неизвестны. Известными являются глубина залегания p - n -перехода x_j , максимальная концентрация примеси C_{\max} и концентрация примеси в исходной пластине полупроводника C_b .

Выражение для глубины залегания p - n -перехода найдем из формулы (16) при $C(x)=0$:

$$x_j = R_p + \Delta R_p \sqrt{2 \ln(C_{\max} / C_b)}.$$

Дозу облучения рассчитаем из соотношения

$$C_{\max} = 0,4N / \Delta R_p \text{ или } N = 2,5 \Delta R_p C_{\max}.$$

Для определения стандартного отклонения пробегов ΔR_p используем графическое решение. Зададим несколько значений энергии, найдем для них ΔR_p и R_p и построим зависимость правой части уравнения (36) от энергии. Затем параллельно оси энергий проведем прямую на уровне заданного значения x_j т. е. построим левую часть уравнения (36). Точка пересечения правой и левой

частей уравнения (36) определяет искомую энергию E . Для найденной энергии рассчитаем стандартное отклонение пробега ΔR_p и вычислим дозу облучения.

Пример 6. Определить энергию ионов и дозу облучения, необходимые для создания p - n -перехода на глубине $x_j=0,3$ мкм с помощью имплантации фосфора в кремний с электропроводностью p -типа и с $C_B=10^{16}$ см⁻³, если необходимо обеспечить $C_{\max} = 5 \cdot 10^{19}$ см⁻³.

1. Согласно уравнению (36),

$$x_j = R_p + \Delta R_p \sqrt{4,6 \lg(5 \cdot 10^{19} / 1 \cdot 10^{16})} = R_p + 4,12 \Delta R_p.$$

2. Построим зависимость $R_p + 4,12 \Delta R_p$ от энергии в диапазоне 80—160 кэВ, пользуясь данными табл.1 (рис.6). На том же рисунке проведем линию? $x_j=0,3$ мкм и по точке пересечения определим $E=113$ кэВ. Для практических целей более удобно задавать энергию ионов кратной 5 или 10 кэВ. Принимаем $E=110$ кэВ.

3. Интерполируя данные табл. 10.1, найдем, что для $E=110$ кэВ $R_p=136$ нм, $\Delta R_p=38$ нм.

4. Найдем дозу облучения:

$$N = 2,5 \Delta R_p C_{\max} = 2,5 \cdot 3,8 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot 10^{19} = 4,75 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}.$$

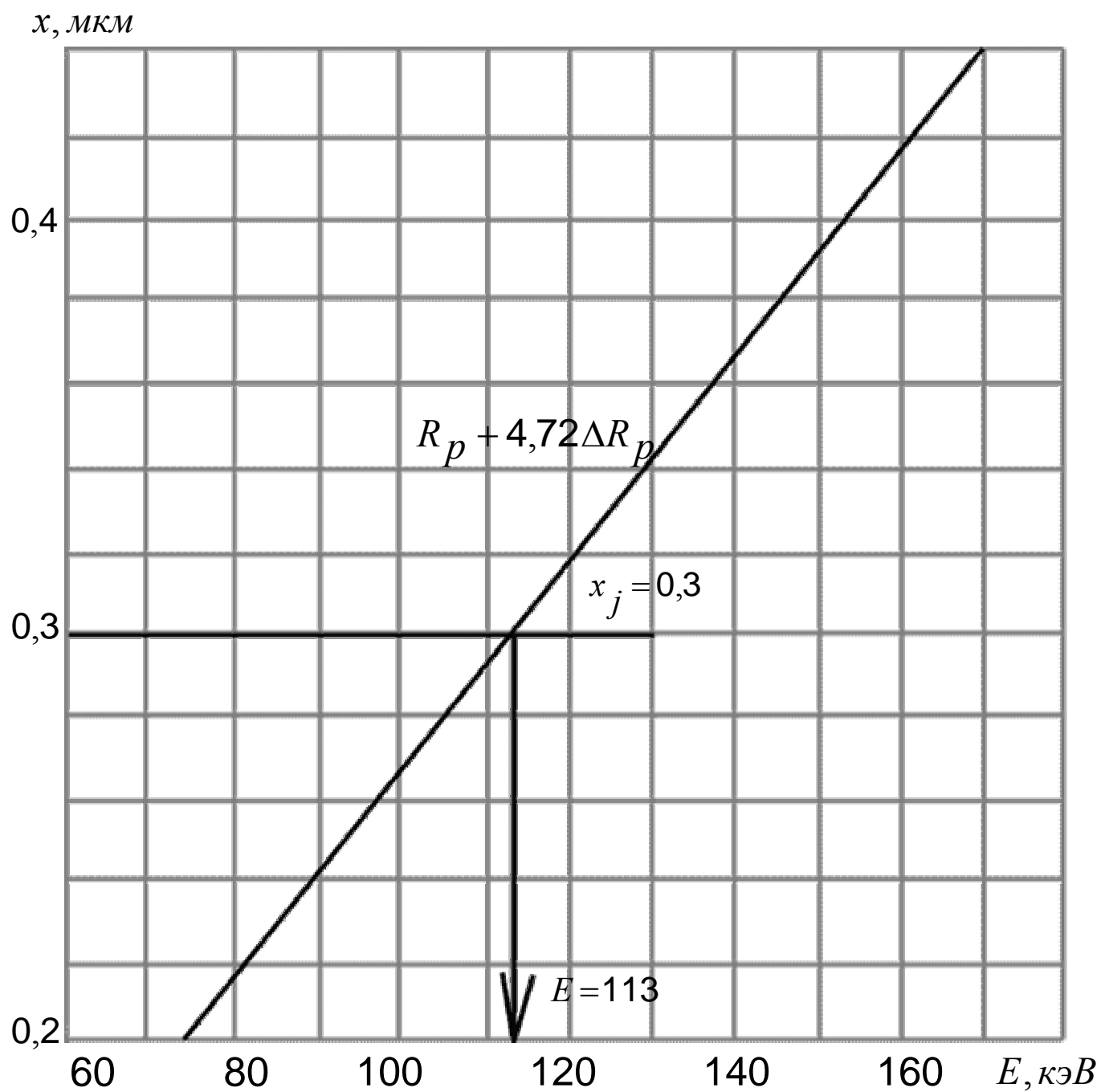


Рис.6. Графическое определение энергии ионов

Расчет режимов имплантации для создания транзисторной структуры.

При выполнении данного расчета используются ранее изложенные способы, поэтому рассмотрим его на конкретном примере создания структуры *n-p-n*-транзистора на кремнии с толщиной базовой области $w=0,1$ мкм, глубиной залегания эмиттерного перехода $x_{jэ}=0,2$ мкм, концентрацией доноров в эпитаксиальном слое $C_B=2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ и максимальными концентрациями акцепторной и донорной примесей $C_{\max a}=3 \cdot 10^{18}$, $C_{\max д}=1 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Создание эмиттерной и базовой областей производится имплантацией фосфора и бора соответственно. Режимы ионной имплантации определяются дозами N_a , N_d и энергиями E_a , E_d . Данная задача в общем виде не решается, поэтому введем ряд упрощающих соотношений.

1. Запишем выражение для глубины залегания коллекторного *p-n*-перехода:

$$x_{jk} = R_{pa} + \Delta R_{pa} \sqrt{2 \ln(C_{\max a} / C_B)} = R_{pa} + \Delta R_{pa} \sqrt{4,61 \lg(3 \cdot 10^{18} / (2 \cdot 10^{16}))} = R_{pa} + 3,16 \Delta R_{pa}.$$

Для ионов с массами $M_1 > M_2$ в диапазоне энергий 20—100 кэВ справедливо приближенное соотношение между пробегом и стандартным отклонением пробега.

$$\Delta R_p / R_p \approx \gamma / 3 \text{ или } \Delta R_p = \gamma R_p / 3.$$

Поэтому

$$x_{jk} = R_{pa} + 3,12 \gamma R_{pa} / 3 \approx 2 R_{pa},$$

откуда

$$R_{pa} = x_{jk} / 2 = 0,3 / 2 = 0,15 \text{ мкм}.$$

Пользуясь табл.1, принимаем $E_a=40$ кэВ, тогда $R_{pa}=0,161$ мкм, $\Delta R_{pa}=0,0538$ мкм. Следовательно,

$$x_{jk} = 0,161 + 3,12 \cdot 0,058 = 0,33 \text{ мкм}.$$

Различие с требуемым значением x_{jk} не превышает 10%, что допустимо.

2. Доза облучения ионами бора

$$N_a = \sqrt{2\pi} \Delta R_{pa} C_{\max a} = \sqrt{2 \cdot 3,14} \cdot 5,38 \cdot 10^{-6} \cdot 3 \cdot 10^{18} = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}.$$

3. Приближенное выражение для глубины залегания эмиттерного *p-n*-перехода

$$x_{jэ} = R_{pд} + \Delta R_{pд} \sqrt{2 \ln(C_{\max д} / C_B)} = R_{pд} + \frac{\gamma}{3} R_{pд} \sqrt{4,61 \lg(1 \cdot 10^{20} / (2 \cdot 10^{16}))} \approx 2,5 R_{pд},$$

откуда

$$R_{pд} = x_{jэ} / 2,5 = 0,2 / 2,5 = 0,08 \text{ мкм}.$$

Пользуясь данными табл.1, принимаем $E_d=80$ кэВ, тогда $R_{pд}=0,098$ мкм, $\Delta R_{pд}=0,0295$ мкм и

$$x_{jэ} = 0,098 + 4,44 \cdot 0,0295 = 0,23 \text{ мкм}.$$

4. Доза облучения ионами фосфора

$$N_d = \sqrt{2\pi} \Delta R_{pд} C_{\max д} = \sqrt{2 \cdot 3,14} \cdot 2,95 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^{20} = 7,4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$$

