Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию
Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова
Кафедра микроэлектроники

Физические основы технологии интегральных систем

Задачник

Рекомендовано
Научно-методическим советом университета
для студентов, обучающихся по специальности
Микроэлектроника и полупроводниковые приборы

Ярославль 2008

УДК 539.2
ББК З 844я73
Ф 48

Рекомендовано
Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного издания. План 2008 года

Рецензент
кафедра микроэлектроники
Ярославского государственного университета им. П.Г. Демидова

Составитель
С.П. Зимин

Ф 48 **Физические основы технологии интегральных систем:** задачник / сост. С.П. Зимин; Яросл. гос. ун-т. – Ярославль: ЯрГУ, 2008. – 36 с.

В задачнике содержатся задания и справочные материалы для самостоятельной работы студентов при изучении физических основ микроэлектронных технологических процессов.

Предназначен для студентов 3 курса, обучающихся по специальности 010803 Микроэлектроника и полупроводниковые приборы (дисциплина «Основы технологии интегральных и низкоразмерных систем», блок ОПД), очной формы обучения.

Ил.9. Библиогр.:14 назв.

УДК 539.2
ББК З 844я73

© Ярославский государственный университет, 2008

Материалы задач расположены в соответствии с разделами лекционного курса и предназначены для закрепления теоретического материала. Каждый студент обязан выполнить решение одного из вариантов по каждой из трех предложенных тем. Для решения необходимо использовать рабочие формулы (графики, таблицы), обсуждаемые на лекциях, или находящиеся в учебных изданиях из приведенного списка литературы. Некоторые справочные материалы студент найдет в конце задачника. При работе стоит обратить особое внимание на физическую сторону получаемых решений, на возможность реализации данных величин в технологических процессах. Часть задач содержит провокационные условия. Студенту в этом случае необходимо представить физически обоснованные доводы, почему эта задача не может быть решена, что надо изменить в условиях для корректного решения. При формировании сборника использовались задачи, составленные автором, и упражнения из [1 – 9], [14].

Решение задач выполняется студентом на отдельных листах, которые сдаются преподавателю в назначенный срок. При выявлении ошибок проводится работа над неверно решенными задачами, и листы с решениями вновь возвращаются преподавателю. Предпочтение следует отдавать вычислениям, проводимым на компьютере. Математические программы, применяемые для решения, обсуждаются на лекциях. Можно использовать специальные программы вычислений, имеющиеся в Интернете. Так, для расчетов параметров ионной имплантации рекомендуется сайт *http://www.ee.byu.edu/cleanroom/implantConCal.* Для желающих могут быть предложены задачи повышенной сложности.

Задачи по теме 1 «Технология гибридных интегральных схем. Расчет параметров пленочных элементов»

Вариант 1

1. Определить сопротивление пленочного резистора длиной 3 мм и шириной 0,5 мм, если поверхностное сопротивление составляет 5 Ом/ .

2. Рассчитать сопротивление резистора Г-образной формы, если ширина резистора 0,3 мм, а длины внешних плеч составляют 3 и 5 мм. Поверхностное сопротивление – 10 кОм/ .

3. Что такое допустимая рассеиваемая мощность резистивного пленочного материала?

4. Определить минимальные размеры резистора номиналом 150 Ом с мощностью рассеивания 10 мВт, выполненного из хрома с поверхностным сопротивлением 500 Ом/ .

5. Найдите максимальную емкость тонкопленочного конденсатора с диэлектриком SiO и размерами верхней обкладки 100x100 мкм^2 при рабочем напряжении 30 В.

6. Рассчитайте индуктивность круглой спирали, если ширина проводника 1 мм, шаг спирали 1 мм, число витков 5, внешний диаметр 25 мм.

Вариант 2

1. Определите поверхностное сопротивление резистивного материала, если сопротивление резистора прямоугольной формы равно 450 Ом, длина 10 мм, ширина 2 мм.

2. Рассчитать сопротивление резистора П-образной формы, если каждая сторона имеет длину 10 мм, а ширина резистора 0,5 мм. Поверхностное сопротивление 1 кОм/ .

3. Определить минимальные размеры резистора номиналом 250 Ом с мощностью рассеивания 10 мВт, выполненного из нихрома с поверхностным сопротивлением 100 Ом/ . Допустимая рассеиваемая мощность 2 Вт/см^2.

4. Рассчитать величину удельной емкости пленочного конденсатора, если площадь верхней обкладки 1,5х1,5 мм^2, а емкость конденсатора 50 пФ.

5. Что такое «тиксотропность»? Назовите области микроэлектроники, где это свойство применяется.

6. Чем определяется добротность тонкопленочных конденсаторов? Может ли диэлектрик тонкопленочного конденсатора одновременно обладать низким удельным сопротивлением и низким tgδ?

Вариант 3

1. Одинаковы ли сопротивления пленочных резисторов, выполненных в одном процессе нанесения, если их размеры 12х3 и 1х0,3 мм^2?

2. Чему равно поверхностное сопротивление резистивного материала, если резистор П-образной формы имеет номинал 1,5 кОм? Размеры элементов внешних плеч резистора 1,2, 1,8 и 2,7 мм. Ширина резистора 0,3 мм.

3. Определить минимальные размеры резистора номиналом 50 Ом с мощностью рассеивания 1 мВт, выполненного из сплава МЛТ-3 с поверхностным сопротивлением 50 Ом/ .

4. Изготовлены два одинаковых пленочных конденсатора со слоями диэлектрика SiO и SiO_2. Насколько будут отличаться номиналы конденсаторов?

5. Рассчитайте индуктивность круглой спирали, если ширина проводника 0,3 мм, шаг спирали 1,5 мм, число витков 5, внешний диаметр 30 мм.

6. Почему при изготовлении толстопленочных ГИС существует определенная последовательность вжигания проводниковых, резистивных и диэлектрических паст?

Вариант 4

1. Сравните поверхностные сопротивления материалов двух резисторов: А: 250 Ом, 2,5х0,5 мм^2, Б: 450 Ом, 3,7х0,6 мм^2.

2. Существенно ли будут влиять два контактных сопротивления по 50 Ом на общее сопротивление резистора Г-образной формы с внешним размером сторон 10 и 12 мм при величине поверхностного сопротивления 120 Ом/ и ширине резистора 1 мм?

3. Определить минимальные размеры резистора номиналом 5000 Ом с мощностью рассеивания 10 мВт, выполненного из кермета К-20С с поверхностным сопротивлением 1000 Ом/ .

4. Найдите максимальную емкость тонкопленочного конденсатора с диэлектриком из SiO_2, размерами верхней обкладки 150х200 мкм^2 и рабочим напряжением 10 В.

5. Рассчитайте величину индуктивности спирали квадратной формы, если ширина проводника 0,2 мм, расстояние между проводниками 0,5 мм, число витков 6, внешний размер индуктивности 20 мм.

6. Чем различаются материалы, применяемые для создания изолирующих и конденсаторных слоев в гибридной интегральной схеме?

Вариант 5

1. Во сколько раз будут отличаться сопротивления пленочных резисторов, выполненных из материалов с поверхностным сопротивлением 10 кОм/ и 30 кОм/ , если размеры первого резистора 8х0,4 мм^2, второго – 10х0,8 мм^2?

2. Чему равно поверхностное сопротивление резистивного материала, если сопротивление резистора Г-образной формы с внешними плечами 10х6 мм составляет 50 кОм? Ширина резистора 0,6 мм.

3. Определите минимальные размеры резистора номиналом 850 Ом с мощностью рассеивания 10 мВт, выполненного из нихрома с поверхностным сопротивлением 200 Ом/ . Допустимая рассеиваемая мощность 2 Вт/см^2.

4. Равны ли будут емкости пленочных конденсаторов, если они содержат один и тот же диэлектрик, но имеют разные гео-

метрические размеры верхней обкладки: 1,2х1,7 мм^2 и 2,00х1,02 мм^2?

5. Чем вызвана необходимость применения разных методов нанесения пленок в тонкопленочной технологии?

6. Как можно увеличить индуктивность пленочной спирали?

Вариант 6

1. Сравните сопротивления двух резисторов, выполненных из пленок одного материала одинаковой толщины: А: прямоугольный резистор 7х0,7 мм^2, Б: резистор Г-образной формы с шириной 1 мм и внешними плечами 4 и 7 мм.

2. Чему равно поверхностное сопротивление резистивного материала, если резистор П-образной формы имеет номинал 2,5 кОм? Размеры элементов внешних плеч резистора 1,0, 1,8 и 3,7 мм. Ширина резистора 0,3 мм.

3. Определить минимальные размеры резистора номиналом 250 Ом с мощностью рассеивания 5 мВт, выполненного из тантала с поверхностным сопротивлением 25 Ом/ .

4. Изготовлены два одинаковых пленочных конденсатора со слоями диэлектрика Si_3N_4 и SiO_2. Насколько будут отличаться номиналы конденсаторов?

5. Рассчитайте индуктивность круглой спирали, если ширина проводника 0,1 мм, шаг спирали 0,5 мм, число витков 3, внешний диаметр 15 мм.

6. Каким способом получаются мелкодисперсные стекла для паст в технологии гибридных интегральных схем?

Вариант 7

1. Одинаковы ли сопротивления пленочных резисторов, выполненных в одном процессе нанесения для следующих случаев. А: резистор простой формы, коэффициент формы равен 12; Б: резистор Г-образной формы с внешними плечами 7 и 3 мм, шириной 0,5 мм?

2. Каким будет сопротивление резистора из сплава МЛТ-3М при 360К, если при комнатной температуре оно составляет 52,0 Ом?

3. Изготовлены три одинаковых пленочных конденсатора со слоями диэлектрика SiO, Al_2O_3 и TiO_2. Насколько будут отличаться номиналы конденсаторов?

4. Рассчитайте индуктивность круглой спирали, если ширина проводника 0,1 мм, шаг спирали 1,3 мм, число витков 4, внешний диаметр 40 мм.

5. Опишите физико-химические процессы, происходящие при вжигании толстопленочных паст в разных температурных диапазонах.

6. Почему для всех резисторов схемы в рамках тонкопленочной технологии рекомендуется использовать материал с одним поверхностным сопротивлением, а в толстопленочной технологии – с разным поверхностным сопротивлением?

Вариант 8

1. Сравните поверхностные сопротивления материалов двух резисторов. А: 150 Ом, 1,5х0,3 мм^2, Б: 250 Ом, 2,7х0,6 мм^2.

2. Определите величину контактных сопротивлений резистора, если общее сопротивление резистора Г-образной формы с внешним размером сторон по 11 мм при величине поверхностного сопротивления 100 Ом/ и ширине резистора 1 мм составляет 15 кОм?

3. Определите минимальные размеры резистора номиналом 350 Ом с мощностью рассеивания 1 мВт, выполненного из нихрома с поверхностным сопротивлением 25 Ом/ . Допустимая рассеиваемая мощность 2 Вт/см^2.

4. Найдите минимально возможную толщину диэлектрика Al_2O_3 в тонкопленочном конденсаторе, рассчитанном на рабочее напряжение 10 В.

5. Рассчитайте величину индуктивности спирали квадратной формы, если ширина проводника 0,15 мм, расстояние между проводниками 0,5 мм, число витков 5, внешний размер индуктивности 25 мм.

6. Чем обусловлено высокое электрическое сопротивление в керметах ?

Вариант 9

1. Во сколько раз будут отличаться сопротивления пленочных резисторов, выполненных из материалов с поверхностным сопротивлением 20 кОм/ и 100 кОм/ , если размеры первого резистора 6х0,2 мм^2, а второго – 12х0,9 мм^2?

2. Чему равно поверхностное сопротивление резистивного материала, если полное сопротивление резистора Г-образной формы с внешними плечами 10 и 5 мм составляет 60 кОм, а сопротивления контактов в сумме равны 10 кОм? Ширина резистора 0,5 мм.

3. Определите минимальные размеры резистора номиналом 250 Ом с мощностью рассеивания 10 мВт, выполненного из тантала с поверхностным сопротивлением 100 Ом/ .

4. Как изменится емкость пленочного конденсатора при повышении температуры до 340К, если он содержит диэлектрик TiO_2, имеет геометрические размеры верхней обкладки 1,0х1,9 мм^2 и толщину слоя диэлектрика 1 мкм?

5. Запишите формулу емкости многослойного конденсатора и поясните порядок соединения обкладок.

6. Какие условия учитываются при выборе минимальной ширины пленочного резистора?

Вариант 10

1. Сравните сопротивления двух резисторов, выполненных из пленок одного материала одинаковой толщины. А: прямоугольный резистор 5х0,3 мм^2, Б: резистор П-образной формы с шириной 1 мм и внешними плечами по 7 мм.

2. Определите удельное контактное сопротивление, если на долю контактов приходится 5% от полного сопротивления резистора 25 кОм, а две контактные площадки имеют размеры 1х1 мм^2 каждая.

3. Определите минимальные размеры резистора номиналом 250 кОм с мощностью рассеивания 10 мВт, выполненного из кермета К-20С с поверхностным сопротивлением 1000 Ом/ .

4. Изготовлены два одинаковых пленочных конденсатора со слоями диэлектрика Al_2O_3 и SiO_2. Насколько будут отличаться емкости конденсаторов?

5. Рассчитайте индуктивность круглой спирали, если ширина проводника 0,2 мм, шаг спирали 0,6 мм, число витков 4, внешний диаметр 45 мм.

6. Нарисуйте линии тока в резисторе Г-образной формы и поясните эффект дополнительного нагрева внутреннего угла резистора.

Задачи по теме 2 «Диаграммы состояний. Эпитаксия. Процессы термического окисления кремния»

Вариант 1

1. Описать диаграмму состояний «алюминий – кремний». Какая максимально возможная температура вжигания алюминиевых контактов на кремнии?

2. Найти время, необходимое для выращивания слоев диоксида кремния толщиной 500 нм на кремнии ориентации (111) при температуре 1100˚С в сухом кислороде и в парах воды.

3. Показать, что если подвергнуть кремниевую пластину ряду последовательных операций термического окисления, то результирующая толщина пленки будет определяться из выражения $x^2=x_1^2+x_2^2+\ldots+x_n^2$, где x_1, $x_2\ldots x_n$ – толщины окисла, которые были бы получены при проведении каждой из этих операций на неокисленной пластине. Сформулируйте, для каких условий справедлива данная формула?

4. Кремниевая пластина ориентации (100) окисляется несколько раз в процессе изготовления интегральной схемы. Найти результирующую толщину окисла после каждой из последовательных операций: А – при 1100˚С 60 минут в сухом кислороде; Б – 1000˚С 2 часа в водяном паре; В – при 1000˚С 6 часов в сухом кислороде.

5. В маскирующем оксидном слое толщиной x_1 вытравливается диффузионное окно. В окне выращивается слой окисла толщиной x_2. Толщина маскирующего слоя при этом возрастает до x_3. Показать, что высота ступени на поверхности кремния определяется выражением $h=0{,}44\ (x_2-x_3+x_1)$.

6. Опишите условия и механизм образования квантовых точек при молекулярно-лучевой эпитаксии по механизму Странски-Крастанова.

Вариант 2

1. Описать диаграмму состояний «золото – кремний». Какая минимальная температура пайки необходима для установки кристалла кремния на золотую подложку?

2. Найти время, необходимое для выращивания слоев диоксида кремния толщиной 300 нм на кремнии ориентации (111) при температуре 1200˚С в сухом кислороде и в парах воды.

3. Показать, что если подвергнуть кремниевую пластину ряду последовательных операций термического окисления, то результирующая толщина пленки будет определяться из выражения $x^2=x_1^2+x_2^2+\ldots+x_n^2$, где x_1, $x_2\ldots x_n$ – толщины окисла, которые были бы получены при проведении каждой из этих операций на неокисленной пластине. Сформулируйте, для каких условий справедлива данная формула?

4. Кремниевая пластина ориентации (100) окисляется несколько раз в процессе изготовления интегральной схемы. Найти результирующую толщину окисла после каждой из последовательных операций: А – при 1200˚С 40 минут в сухом кислороде; Б – 1100˚С 1,5 часа в водяном паре; В – при 1000˚С 4 часа в сухом кислороде.

5. В кремниевой пластине создана глубокая вертикальная канавка шириной 1 мкм. Пластина окисляется в парах воды при температуре 1000˚С для заполнения канавки окислом. Какова будет результирующая ширина полоски диоксида кремния? Сколько на это потребуется времени?

6. Сформулируйте основные отличия метода молекулярно-лучевой эпитаксии от других вакуумных методов.

Вариант 3

1. Опишите диаграмму состояний «серебро – кремний». Проанализируйте, может ли эта система быть применена для жидкофазной эпитаксии кремния.

2. Найти время, необходимое для выращивания слоев диоксида кремния толщиной 800 нм на кремнии ориентации (111) при температуре 1300˚С в сухом кислороде и в парах воды.

3. Показать, что если подвергнуть кремниевую пластину ряду последовательных операций термического окисления, то результирующая толщина пленки будет определяться из выражения $x^2=x_1^2+x_2^2+\ldots+x_n^2$, где x_1, $x_2\ldots x_n$ – толщины окисла, которые были бы получены при проведении каждой из этих операций на неокисленной пластине. Сформулируйте, для каких условий справедлива данная формула?

4. Кремниевая пластина ориентации (100) окисляется несколько раз в процессе изготовления интегральной схемы. Найти результирующую толщину окисла после каждой из последовательных операций: А – при 1300˚С 50 минут в сухом кислороде; Б – 1200˚С 1 час в водяном паре; В – при 1000˚С 3 часа в сухом кислороде.

5. В кремниевой пластине ориентации (111) локально формируется область диоксида кремния. Верхний уровень этой области должен совпадать с поверхностью подложки. Какой глубины надо сделать ямку при толщине формируемого окисла 300 нм? Сколько времени займет процесс окисления, проводимого в сухом кислороде при 1200˚С?

6. Проведите сравнительный анализ эпитаксиальных пленок кремния, полученных из парогазовой фазы по силановой и хлоридной технологиям.

Вариант 4

1. Опишите диаграмму состояний «индий – галлий». Поясните, какие свойства эвтектики «индий – галлий» позволяют использовать ее для изготовления жидких контактов к полупроводниковым материалам.

2. Найти время, необходимое для выращивания слоев диоксида кремния толщиной 600 нм на кремнии ориентации (111) при температуре 1150˚С в сухом кислороде и в парах воды.

3. Показать, что если подвергнуть кремниевую пластину ряду последовательных операций термического окисления, то результирующая толщина пленки будет определяться из выражения $x^2=x_1^2+x_2^2+\ldots+x_n^2$, где x_1, $x_2\ldots x_n$ – толщины окисла, которые были бы получены при проведении каждой из этих операций на не-

окисленной пластине. Сформулируйте, для каких условий справедлива данная формула?

4. Кремниевая пластина ориентации (100) окисляется несколько раз в процессе изготовления интегральной схемы. Найти результирующую толщину окисла после каждой из последовательных операций: А – при 1250˚С 50 минут в сухом кислороде; Б – 1150˚С 1 час в водяном паре; В – при 900˚С 4 часа в сухом кислороде.

5. Кремниевая пластина ориентации (100) покрыта слоем окисла 200 нм. Какое дополнительное время потребуется для того, чтобы вырастить еще 100 нм диоксида кремния в сухом кислороде при 1000˚С?

6. Сформулируйте основные технологические возможности метода молекулярно-лучевой эпитаксии.

Вариант 5

1. Опишите диаграмму состояний «германий – галлий». Если нанести пленку галлия на германий, то какая температура последующей термообработки возможна в данной пленочной системе?

2. Найти время, необходимое для выращивания слоев диоксида кремния толщиной 350 нм на кремнии ориентации (111) при температуре 1050˚С в сухом кислороде и в парах воды.

3. Показать, что если подвергнуть кремниевую пластину ряду последовательных операций термического окисления, то результирующая толщина пленки будет определяться из выражения $x^2=x_1^2+x_2^2+\ldots+x_n^2$, где x_1, $x_2\ldots x_n$ – толщины окисла, которые были бы получены при проведении каждой из этих операций на неокисленной пластине. Сформулируйте, для каких условий справедлива данная формула?

4. Кремниевая пластина ориентации (100) окисляется несколько раз в процессе изготовления интегральной схемы. Найти результирующую толщину окисла после каждой из последовательных операций: А – при 1000˚С 30 минут в сухом кислороде; Б – 1150˚С 1 час в водяном паре; В – при 950˚С 2 часа в сухом кислороде.

5. Кремниевая пластина ориентации (100) покрыта слоем окисла 100 нм. Какое дополнительное время потребуется для то-

го, чтобы вырастить еще 100 нм диоксида кремния в парах воды при 1100˚С?

6. Опишите основные конструктивные отличия технологической установки метода «горячей стенки» от установки метода вакуумного осаждения.

Вариант 6

1. Опишите диаграмму состояний «германий – индий». Если нанести пленку индия на германий, то какая температура последующей термообработки возможна в данной пленочной системе?

2. Найти время, необходимое для выращивания слоев диоксида кремния толщиной 150 нм на кремнии ориентации (111) при температуре 950˚С в сухом кислороде и в парах воды.

3. Показать, что если подвергнуть кремниевую пластину ряду последовательных операций термического окисления, то результирующая толщина пленки будет определяться из выражения $x^2=x_1^2+x_2^2+\ldots+x_n^2$, где x_1, $x_2\ldots x_n$ – толщины окисла, которые были бы получены при проведении каждой из этих операций на неокисленной пластине. Сформулируйте, для каких условий справедлива данная формула?

4. Кремниевая пластина ориентации (100) окисляется несколько раз в процессе изготовления интегральной схемы. Найти результирующую толщину окисла после каждой из последовательных операций: А – при 1200˚С 50 минут в сухом кислороде; Б – 1150˚С 2 часа в водяном паре; В – при 950˚С 1 час в сухом кислороде.

5. В маскирующем оксидном слое толщиной x_1 вытравливается диффузионное окно. В окне выращивается слой окисла толщиной x_2. Толщина маскирующего слоя при этом возрастает до x_3. Показать, что высота ступени на поверхности кремния определяется выражением $h=0{,}44(x_2-x_3+x_1)$.

6. Поясните различия в терминах «эпитаксиальная пленка», «поликристаллическая пленка», «текстурированная пленка», «аморфная пленка».

Вариант 7

1. Опишите диаграмму состояний «германий – алюминий». Если нанести пленку алюминия на германий, то какая температура последующей термообработки возможна в данной пленочной системе?

2. Найдите время, которое потребуется для нанесения оксидного слоя толщиной 450 нм при температуре 1050˚С. Процесс оксидирования характеризуется параметрами А=0,31 мкм, В=0,47 мкм^2/час.

3. Показать, что если подвергнуть кремниевую пластину ряду последовательных операций термического окисления, то результирующая толщина пленки будет определяться из выражения $x^2=x_1^2+x_2^2+\ldots+x_n^2$, где x_1, $x_2\ldots x_n$ – толщины окисла, которые были бы получены при проведении каждой из этих операций на неокисленной пластине. Сформулируйте, для каких условий справедлива данная формула?

4. Кремниевая пластина ориентации (100) окисляется несколько раз в процессе изготовления интегральной схемы. Найти результирующую толщину окисла после каждой из последовательных операций: А – при 1000˚С 120 минут в сухом кислороде; Б – 1250˚С 2 часа в водяном паре; В – при 850˚С 1 час в сухом кислороде.

5. В кремниевой пластине ориентации (100) локально формируется область диоксида кремния. Верхний уровень этой области должен совпадать с поверхностью подложки. Какой глубины надо сделать ямку при толщине формируемого окисла 300 нм? Сколько времени займет процесс окисления, проводимого в сухом кислороде при 1200˚С?

6. Какими методами эпитаксии возможно получать ультратонкие пленки полупроводников толщиной в несколько нанометров? Дайте обоснование своим выводам.

Вариант 8

1. Опишите диаграмму состояний «германий – золото». Если нанести пленку золота на германий, то какая температура последующей термообработки возможна в данной пленочной системе?

2. Найдите время, которое потребуется для нанесения оксидного слоя толщиной 250 нм при температуре 1050˚С. Процесс оксидирования характеризуется параметрами А=0,31 мкм, В=0,47 мкм^2/час.

3. Показать, что если подвергнуть кремниевую пластину ряду последовательных операций термического окисления, то результирующая толщина пленки будет определяться из выражения $x^2=x_1^2+x_2^2+\ldots+x_n^2$, где x_1, $x_2\ldots x_n$ – толщины окисла, которые были бы получены при проведении каждой из этих операций на неокисленной пластине. Сформулируйте, для каких условий справедлива данная формула?

4. Кремниевая пластина ориентации (100) окисляется несколько раз в процессе изготовления интегральной схемы. Найти результирующую толщину окисла после каждой из последовательных операций: А – при 1000˚С 180 минут в сухом кислороде; Б – 1050˚С 2 часа в водяном паре; В – при 1150˚С 2 часа в сухом кислороде.

5. В кремниевой пластине создана глубокая вертикальная канавка шириной 1 мкм. Пластина окисляется в парах воды при температуре 1000˚С для заполнения канавки окислом. Какова будет результирующая ширина полоски диоксида кремния? Сколько на это потребуется времени?

6. Опишите свойства металла-растворителя в методе жидкофазной эпитаксии.

Вариант 9

1. Опишите диаграмму состояний «германий – олово». Если нанести пленку олова на германий, то какая температура последующей термообработки возможна в данной пленочной системе?

2. Найдите время, которое потребуется для нанесения оксидного слоя толщиной 2 мкм при температуре 920˚С при давлении

пара 25 атм. Процесс оксидирования характеризуется параметрами А=0,5 мкм, В=5,0 мкм^2/час.

3. Показать, что если подвергнуть кремниевую пластину ряду последовательных операций термического окисления, то результирующая толщина пленки будет определяться из выражения $x^2=x_1^2+x_2^2+\ldots+x_n^2$, где x_1, $x_2\ldots x_n$ – толщины окисла, которые были бы получены при проведении каждой из этих операций на неокисленной пластине. Сформулируйте, для каких условий справедлива данная формула?

4. Кремниевая пластина ориентации (100) окисляется несколько раз в процессе изготовления интегральной схемы. Найти результирующую толщину окисла после каждой из последовательных операций: А – при 950˚С 180 минут в сухом кислороде; Б – 950˚С 3 часа в водяном паре; В – при 950˚С 2 часа в сухом кислороде.

5. Кремниевая пластина ориентации (111) покрыта слоем окисла 200 нм. Какое дополнительное время потребуется для того, чтобы вырастить еще 100 нм диоксида кремния в сухом кислороде при 1000˚С?

6. Поясните суть процесса эпитаксии с применением металлоорганических соединений.

Вариант 10

1. Опишите диаграмму состояний «германий – свинец». Если нанести пленку свинца на германий, то какая температура последующей термообработки возможна в данной пленочной системе?

2. Сравните время, которое потребуется для нанесения оксидных слоев в парах воды толщиной 0,22 мкм и 1 мкм при температуре 920˚С при давлении пара 25 атм. Процесс оксидирования характеризуется параметрами А=0,5 мкм, В=5,0 мкм^2/час.

3. Показать, что если подвергнуть кремниевую пластину ряду последовательных операций термического окисления, то результирующая толщина пленки будет определяться из выражения $x^2=x_1^2+x_2^2+\ldots+x_n^2$, где x_1, $x_2\ldots x_n$ – толщины окисла, которые были бы получены при проведении каждой из этих операций на неокисленной пластине. Сформулируйте, для каких условий справедлива данная формула?

4. Кремниевая пластина ориентации (100) окисляется несколько раз в процессе изготовления интегральной схемы. Найти результирующую толщину окисла после каждой из последовательных операций: А – при 1150˚С 160 минут в сухом кислороде; Б – 1150˚С 1,4 часа в водяном паре; В – при 1150˚С 2,3 часа в сухом кислороде.

5. Кремниевая пластина ориентации (111) покрыта слоем окисла 100 нм. Какое дополнительное время потребуется для того, чтобы вырастить еще 100 нм диоксида кремния в парах воды при 1100˚С?

6. Какими свойствами должна обладать лодочка в методе Нельсона жидкофазной эпитаксии?

Задачи по теме 3
«Термическая диффузия. Ионная имплантация. Металлизация»

Вариант 1

1. Чему будет равна поверхностная концентрация примеси бора при загонке в кремний при температуре 1200˚С?

2. При температуре 1150˚С происходит диффузия фосфора из неограниченного источника в кремний КДБ-1 в течение 60 минут. Построить профиль распределения примеси и графически определить глубину залегания p-n перехода. Сравнить это значение с вычислениями по формуле.

3. В кремний КЭФ-10 проводится двухстадийная диффузия бора. Загонка происходит при температуре 1000˚С 20 минут, разгонка при 1200˚С 1 час. Построить профиль распределения примеси и определить глубину залегания p-n перехода.

4. Какая энергия ионов фосфора необходима для создания максимальной концентрации $1 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ на глубине 1000 Å пластины КДБ-10? Какая при этом необходима доза и каков при этом разброс?

5. При ионной имплантации бора в КЭФ-7,5 максимальная концентрация составила $2 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$. Глубина залегания перехода составила 200 нм. Определите энергию ионов и дозу облучения.

6. Какие проблемы приходится решать при создании медной металлизации в интегральных схемах?

Вариант 2

1. Чему будет равна поверхностная концентрация примеси бора при загонке в кремний при температуре 1000˚С?

2. При температуре 1200˚С происходит диффузия фосфора из неограниченного источника в кремний КДБ-10 в течение 40 минут. Построить профиль распределения примеси и графически

определить глубину залегания p-n перехода. Сравнить это значение с вычислениями по формуле.

3. В кремний КЭФ-10 проводится двухстадийная диффузия бора. Загонка происходит при температуре 1100˚С 10 минут, разгонка при 1200˚С 1,5 часа. Построить профиль распределения примеси и определить глубину залегания p-n перехода.

4. Какая энергия ионов фосфора необходима для создания максимальной концентрации $1 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ на глубине 1250 Å пластины КДБ-1? Какая при этом необходима доза и каков при этом разброс?

5. При ионной имплантации бора в КЭФ-20 максимальная концентрация составила $2 \cdot 10^{16}$ см$^{-3}$. Глубина залегания перехода составила 150 нм. Определите энергию ионов и дозу облучения.

6. Оценить сопротивление алюминиевого элемента металлизации размерами 10 мкм х 1 мкм х 100 Å. Какое количество теплоты выделится за 1 минуту в таком элементе при пропускании тока 0,1 мА?

Вариант 3

1. Чему будет равна поверхностная концентрация примеси фосфора при загонке в кремний при температуре 1000˚С?

2. При температуре 1200˚С происходит диффузия бора из неограниченного источника в кремний КЭФ-4,5 в течение 40 минут. Построить профиль распределения примеси и графически определить глубину залегания p-n перехода. Сравнить это значение с вычислениями по формуле.

3. В кремний КДБ-10 проводится двухстадийная диффузия фосфора. Загонка происходит при температуре 1100˚С 10 минут, разгонка при 1200˚С 1,5 часа. Построить профиль распределения примеси и определить глубину залегания p-n перехода.

4. Какая энергия ионов бора необходима для создания максимальной концентрации $1 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ на глубине 500 Å пластины КЭФ-1,0? Какая при этом необходима доза и каков при этом разброс?

5. При ионной имплантации бора в КЭФ-1,0 максимальная концентрация составила $2 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$. Глубина залегания перехода составила 100 нм. Определите энергию ионов и дозу облучения.

6. Опишите этапы конструктивного решения алюминиевой металлизации.

Вариант 4

1. Чему будет равна поверхностная концентрация примеси фосфора при загонке в кремний при температуре 1200˚С?

2. При температуре 1000˚С происходит диффузия бора из неограниченного источника в кремний КЭФ-1,0 в течение 30 минут. Построить профиль распределения примеси и графически определить глубину залегания p-n перехода. Сравнить это значение с вычислениями по формуле.

3. В кремний КДБ-1 проводится двухстадийная диффузия фосфора. Загонка происходит при температуре 1000˚С 15 минут, разгонка при 1250˚С 1 час. Построить профиль распределения примеси и определить глубину залегания p-n перехода.

4. Какая энергия ионов бора необходима для создания максимальной концентрации $3 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ на глубине 400 Å пластины КЭФ-10? Какая при этом необходима доза и каков при этом разброс?

5. При ионной имплантации бора в КЭФ-10 максимальная концентрация составила $5 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$. Глубина залегания перехода составила 300 нм. Определите энергию ионов и дозу облучения.

6. Оценить сопротивление алюминиевого элемента металлизации размерами 100 мкм x 1 мкм x 400 Å. Какое количество теплоты выделится за 1 минуту в таком элементе при пропускании тока 1 мА?

Вариант 5

1. Сравнить величину поверхностной концентрации примеси фосфора и бора при загонке в кремний при температуре 1100˚С?

2. При температуре 900˚С происходит диффузия бора из неограниченного источника в кремний КЭФ-4,5 в течение 15 минут. Построить профиль распределения примеси и графически определить глубину залегания p-n перехода. Сравнить это значение с вычислениями для диффузии фосфора в КДБ-10 при этих же условиях.

3. В кремний КДБ-0,03 проводится двухстадийная диффузия фосфора. Загонка происходит при температуре 1000˚С 25 минут, разгонка при 1200˚С 1 час. Построить профиль распределения примеси и определить глубину залегания p-n перехода.

4. Какая энергия ионов бора необходима для создания максимальной концентрации $3 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ на глубине 200 Å пластины КЭФ-20? Какая при этом необходима доза и каков при этом разброс?

5. При ионной имплантации фосфора в КДБ-10 максимальная концентрация составила $5 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$. Глубина залегания перехода составила 200 нм. Определите энергию ионов и дозу облучения.

6. Оценить сопротивление медного элемента металлизации размерами 50 мкм х 1,5 мкм х 200 Å. Какое количество теплоты выделится за 1 минуту в таком элементе при пропускании тока 5 мА? Сравнить это значение с количеством тепла, выделяющимся на медном проводнике диаметром 10 мм и длиной 100 м.

Вариант 6

1. Чему будет равна поверхностная концентрация примеси бора при загонке в кремний при температуре 900˚С?

2. При температуре 1250˚С происходит диффузия фосфора из неограниченного источника в кремний КДБ-1 в течение 50 минут. Построить профиль распределения примеси и графически определить глубину залегания p-n перехода. Сравнить это значение с вычислениями по формуле.

3. В кремний КЭФ-100 проводится двухстадийная диффузия бора. Загонка происходит при температуре 1100˚С 30 минут, разгонка при 1250˚С 1 час. Построить профиль распределения примеси и определить глубину залегания p-n перехода.

4. Какая энергия ионов фосфора необходима для создания максимальной концентрации $5 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ на глубине 600 Å пластины КДБ-1,0? Какая при этом необходима доза и каков при этом разброс?

5. При ионной имплантации бора в КЭФ-4,5 максимальная концентрация составила $2 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$. Глубина залегания перехода составила 280 нм. Определите энергию ионов и дозу облучения.

6. Сравните преимущества и недостатки алюминиевой и медной металлизаций в интегральных схемах?

Вариант 7

1. Чему будет равна поверхностная концентрация примеси бора при загонке в кремний при температуре 850˚С?

2. При температуре 1100˚С происходит диффузия фосфора из неограниченного источника в кремний КДБ-10 в течение 30 минут. Построить профиль распределения примеси и графически определить глубину залегания p-n перехода. Сравнить это значение с вычислениями по формуле.

3. В кремний КЭФ-10 проводится двухстадийная диффузия бора. Загонка происходит при температуре 900˚С 20 минут, разгонка при 1100˚С 2,5 часа. Построить профиль распределения примеси и определить глубину залегания p-n перехода.

4. Какая энергия ионов фосфора необходима для создания максимальной концентрации $6 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ на глубине 1350 Å пластины КДБ-10? Какая при этом необходима доза и каков при этом разброс?

5. При ионной имплантации бора в КЭФ-2,0 максимальная концентрация составила $4 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$. Глубина залегания перехода составила 50 нм. Определите энергию ионов и дозу облучения.

6. Оценить сопротивление алюминиевого элемента металлизации размерами 150 мкм х 10 мкм х 400 Å. Какое количество теплоты выделится за 1 минуту в таком элементе при пропускании тока 0,3 мА?

Вариант 8

1. Чему будет равна поверхностная концентрация примеси фосфора при загонке в кремний при температуре 1250˚С?

2. При температуре 1200˚С происходит диффузия бора из неограниченного источника в кремний КЭФ-10 в течение 50 минут. Построить профиль распределения примеси и графически определить глубину залегания p-n перехода. Сравнить это значение с вычислениями по формуле.

3. В кремний КДБ-10 проводится двухстадийная диффузия фосфора. Загонка происходит при температуре 1100˚С 10 минут, разгонка при 1200˚С 1,5 часа. Построить профиль распределения примеси и определить глубину залегания p-n перехода.

4. Какая энергия ионов бора необходима для создания максимальной концентрации $1 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ на глубине 500 Å пластины КЭФ-1,0? Какая при этом необходима доза и каков при этом разброс?

5. При ионной имплантации бора в КЭФ-1,0 максимальная концентрация составила $2 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$. Глубина залегания перехода составила 100 нм. Определите энергию ионов и дозу облучения.

6. Опишите этапы конструктивного решения алюминиевой металлизации.

Вариант 9

1. Чему будет равна поверхностная концентрация примеси фосфора при загонке в кремний при температуре 1200˚С?

2. При температуре 20˚С рассчитать величину поверхностного сопротивления на этапе загонки примеси бора в кремний КЭФ-7,5. Загонка проводилась при температуре 1050˚С в течение 20 минут из бесконечного источника с концентрацией, равной предельной растворимости.

3. В кремний КДБ-10 проводится двухстадийная диффузия фосфора. Загонка происходит при температуре 900˚С 25 минут, разгонка при 1250˚С 3 часа. Построить профиль распределения примеси и определить глубину залегания p-n перехода.

4. Какая энергия ионов бора необходима для создания максимальной концентрации $2 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$ на глубине 1500 Å пластины КЭФ-1,0? Какая при этом необходима доза и каков при этом разброс?

5. При ионной имплантации бора в КЭФ-10 максимальная концентрация составила $9 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$. Глубина залегания перехода составила 450 нм. Определите энергию ионов и дозу облучения.

6. Оценить сопротивление алюминиевого элемента металлизации размерами 100 мкм х 0,8 мкм х 300 Å. Какое количество теплоты выделится за 10 минут в таком элементе при пропускании тока 1 мА?

Вариант 10

1. Сравнить величину поверхностной концентрации примеси фосфора и бора при загонке в кремний при температуре 1000˚С?

2. При температуре 20˚С рассчитать величину поверхностного сопротивления на этапе загонки примеси фосфора в кремний КДБ-10. Загонка проводилась при температуре 1150˚С в течение 30 минут из бесконечного источника с концентрацией, равной предельной растворимости.

3. В кремний КДБ-1,0 проводится двухстадийная диффузия фосфора. Загонка происходит при температуре 1100˚С 20 минут, разгонка при 1250˚С 1 час. Построить профиль распределения примеси и определить глубину залегания p-n перехода.

4. Какая энергия ионов бора необходима для создания максимальной концентрации $7 \cdot 10^{17}$ см$^{-3}$ на глубине 1400 Å пластины КЭФ-20? Какая при этом необходима доза и каков при этом разброс?

5. При ионной имплантации фосфора в КДБ-10 максимальная концентрация составила $1 \cdot 10^{19}$ см$^{-3}$. Глубина залегания перехода составила 200 нм. Определите энергию ионов и дозу облучения.

6. Оценить сопротивление медного элемента металлизации размерами 120 мкм х 15 мкм х 300 Å. Какое количество теплоты выделится за 1 минуту в таком элементе при пропускании тока 1 мА? Сравнить это значение с количеством тепла, выделяющимся на медном проводнике диаметром 0,5 мм и длиной 500 м.

Рекомендуемая литература

1. Ефимов, И.Е. Микроэлектроника / И.Е. Ефимов, Ю.И. Горбунов, И.Я. Козырь. – М.: Высшая школа, 1978. – 312 с.

2. Березин, А.С. Технология и конструирование интегральных микросхем / А.С. Березин, О.Р. Мочалкина. – М.: Радио и связь, 1983. – 232 с.

3. Дикарев, Ю.И. Расчет и конструирование гибридных микросхем / Ю.И. Дикарев. – Воронеж: ВГУ, 2001. – 42 с.

4. Матсон, Э.А. Конструирование и технология микросхем / Э.А. Матсон. – Минск: Вышейшая школа, 1985. – 207 с.

5. Курносов, А.И. Технология производства полупроводниковых приборов и интегральных схем / А.И. Курносов, В.В. Юдин. – М.: Высшая школа, 1986. – 388 с.

6. Пичугин, И.Г. Технология полупроводниковых приборов / И.Г. Пичугин, Ю.М. Таиров. – М.: Высшая школа, 1984. – 284 с.

7. Быкадорова, Г.Р. Методы расчета диффузионных структур / Г.Р. Быкадорова и др. – Воронеж: ВГУ, 2002. – 23 с.

8. Готра, З. Технология микроэлектронных устройств: справочник / З. Готра. – М.: Радио и связь, 1991. – 528 с.

9. Парфенов, О.Д. Технология микросхем / О.Д. Парфенов. – М.: Высшая школа, 1986. – 320 с.

10. Барыбин, А.А. Физико-технологические основы электроники / А.А. Барыбин, В.Г. Сидоров. – СПб.: Лань. – 272 с.

11. Аброян, И.А. Физические основы электронной и ионной технологии / И.А. Аброян, А.Н. Андронов, А.И. Титов. – М.: Высшая школа, 1984. – 287 с.

12. Валиев, К.А. Физические основы субмикронной литографии в микроэлектронике / К.А. Валиев, А.В. Раков. – М.: Радио и связь, 1984. – 254 с.

13. Таблицы физических величин: справочник / под ред. И.К. Кикоина. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

14. Соклоф, С. Аналоговые интегральные схемы / С. Соклоф. – М.: Мир, 1988. – 583 с.

Справочные материалы

Таблица 1

Характеристики тонкопленочных резисторов

Материал	Поверхностное сопротивление, Ом/	Температурный коэффициент сопротивления, 10^{-4}, град$^{-1}$	Допустимая рассеиваемая мощность, Вт/см^2
Ta	25-100	-2	3
Cr	50-500	0,6-1,8	1
Нихром	25-300	±1	2
МЛТ-3М	50-500	0,6	2
Кермет К-20С	1000-3000	0,5	2

Таблица 2

Электрические параметры пленочных диэлектриков

Материал	Диэлектрическая проницаемость	Напряженность поля пробоя, 10^6, В/см	Температурный коэффициент емкости, 10^{-4}, град$^{-1}$
SiO	7	2	1-2
SiO_2	4	8	2
Al_2O_3	10	9	1,5-5
Ta_2O_5	25	5	2-3
TiO_2	50	0,2	3
Si_3N_4	6-7	-	-

Таблица 3

Свойства кремния

Тип решетки	Кубическая O_h^7
Постоянная решетки, нм	5,431
Температура плавления, К	1690
Ширина запрещенной зоны, эВ	1,15
Плотность, г/см^3	2,33
Теплопроводность, Вт·см$^{-1}$· град$^{-1}$	1,3

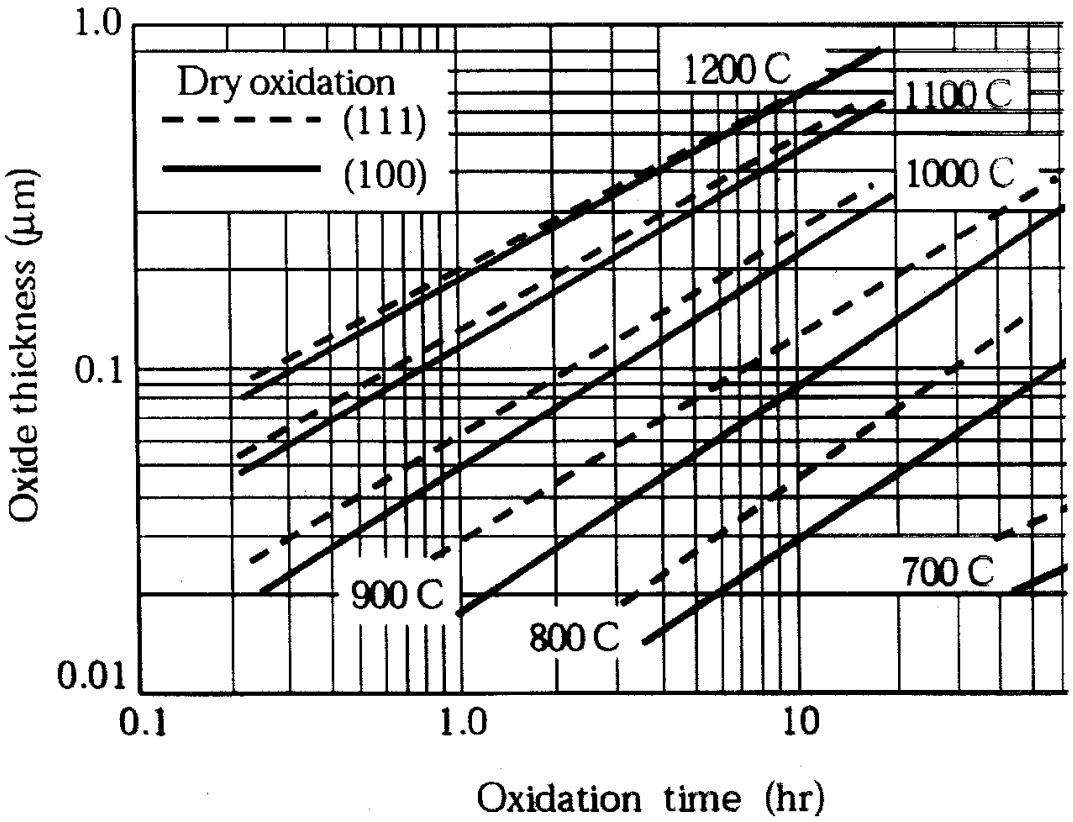


Рис. 1. Параметры окисления кремния в сухом кислороде

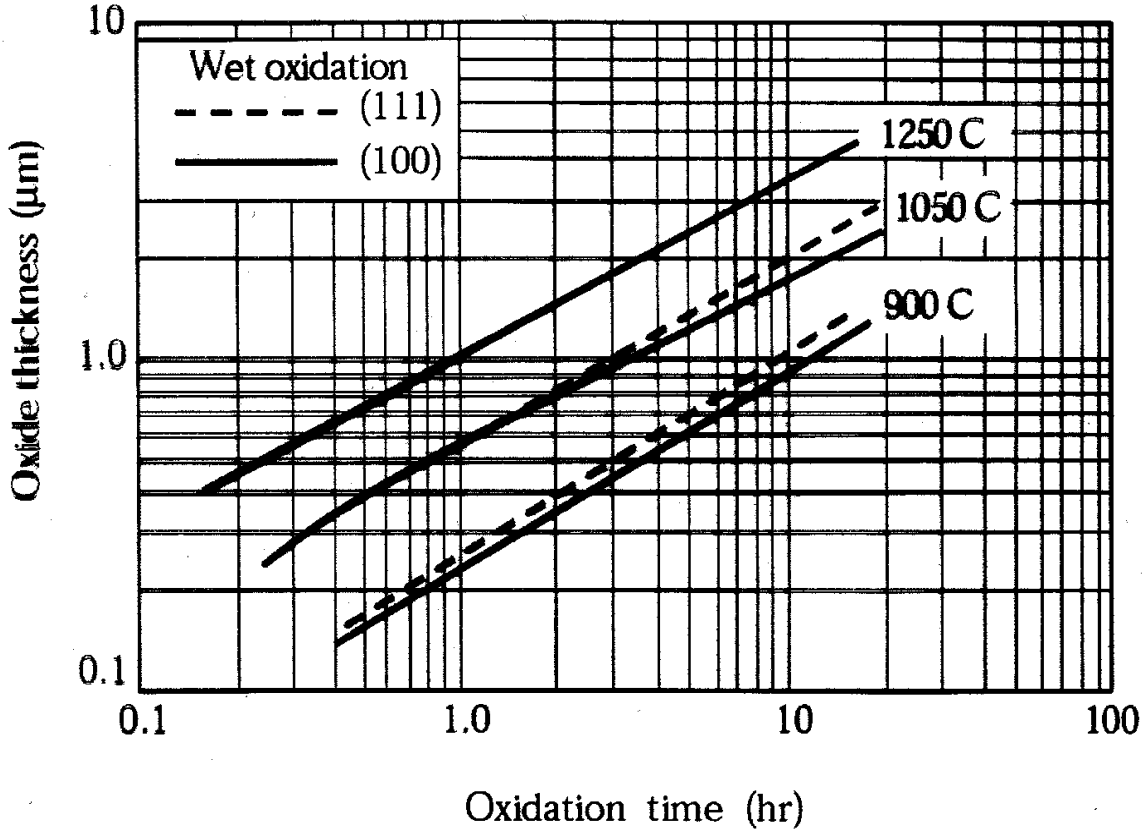


Рис. 2. Параметры окисления кремния в парах воды

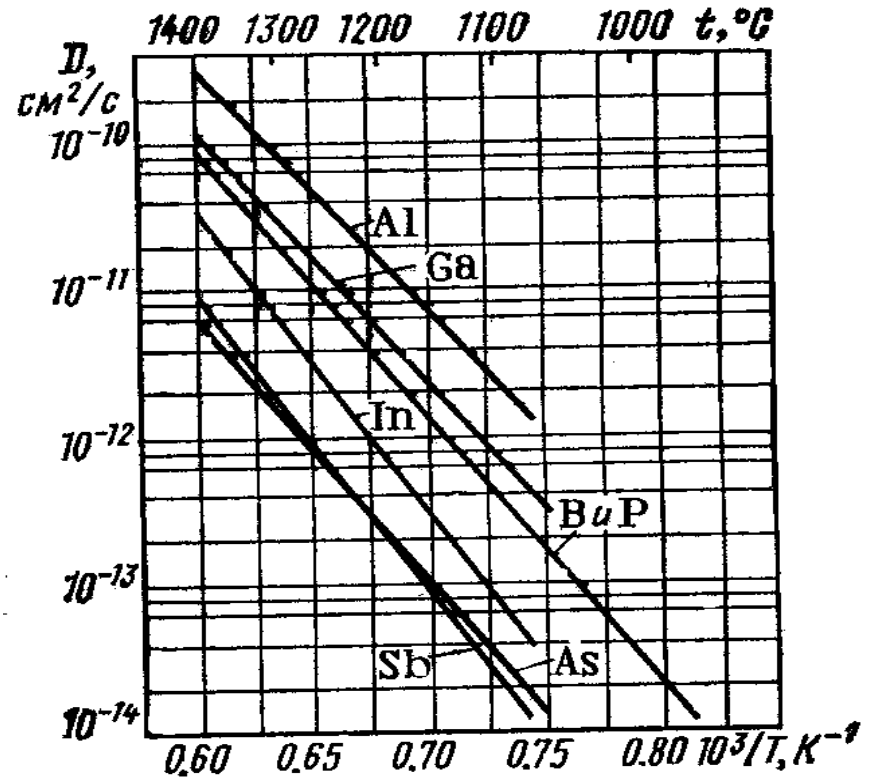


Рис. 3. Коэффициенты диффузии основных легирующих элементов в кремнии

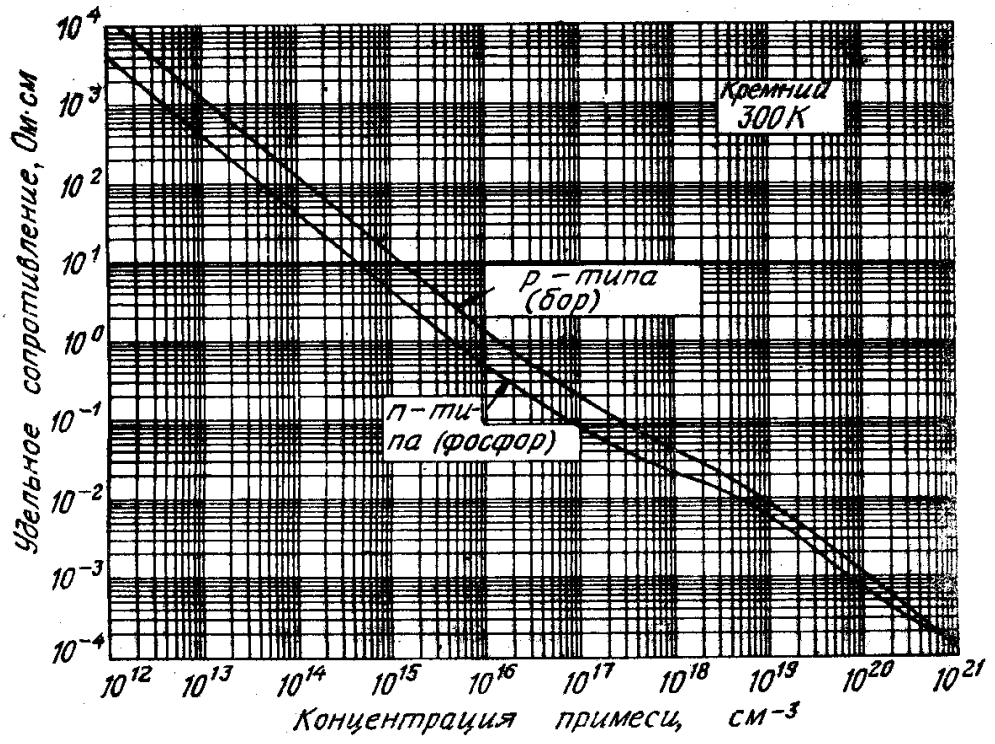


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления кремния от концентрации примеси

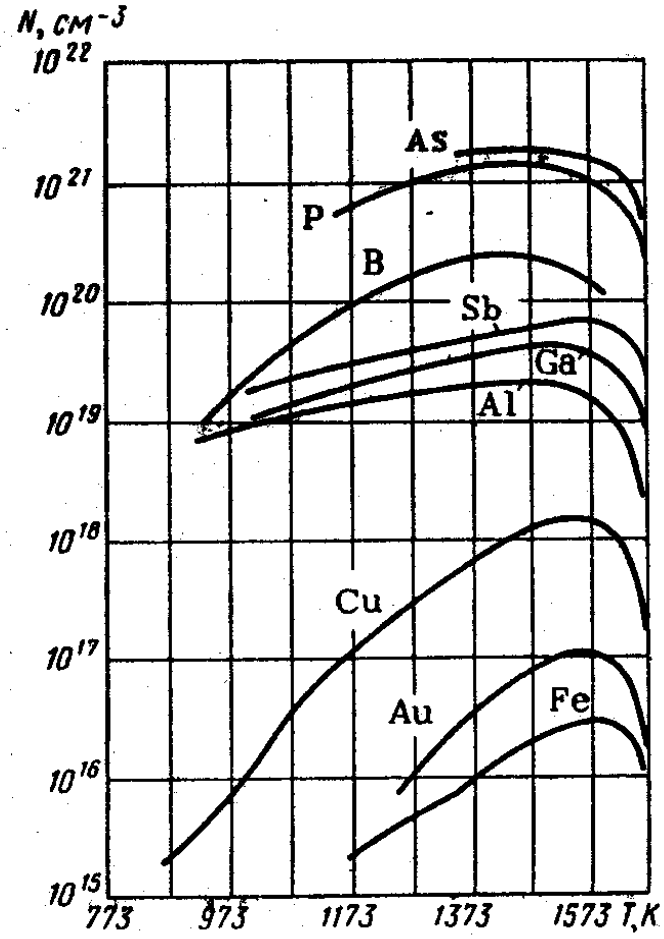


Рис. 5. Предельная растворимость примесей в кремнии

Таблица 4

Значения средней длины пробега $\lambda_{ср}$ и среднего квадратичного отклонения σ для кремниевой мишени при ионной имплантации

Энергия ионов, кэВ	Значения параметров при имплантации примесей															
	B		N		Al		P		Ga		As		In		Sb	
	$\lambda_{ср}$	σ	$\lambda_{ср}$	σ	$\lambda_{ср}$	σ	$\lambda_{ср}$	σ	$\lambda_{ср}$	σ	$\lambda_{ср}$	σ	$\lambda_{ср}$	σ	$\lambda_{ср}$	σ
20	78	32	54	23	29	11	26	9	16	4	16	4	14	2	14	2
40	161	54	112	40	57	19	49	16	28	7	27	6	23	4	23	4
60	244	71	169	53	85	27	73	23	39	9	38	8	31	5	31	5
80	324	84	227	65	115	35	98	29	50	11	48	10	39	7	38	6
100	398	94	284	75	145	42	123	35	61	14	58	12	46	8	46	7
120	469	102	340	84	175	48	149	41	72	16	69	14	54	9	53	8
140	537	110	393	91	205	54	175	47	83	18	79	16	61	10	60	9
160	603	116	443	97	236	60	201	52	94	20	89	18	68	11	67	10
180	665	121	492	103	266	65	228	57	105	22	99	20	76	12	74	11
200	725	126	541	108	297	70	254	61	117	24	110	22	83	13	81	12

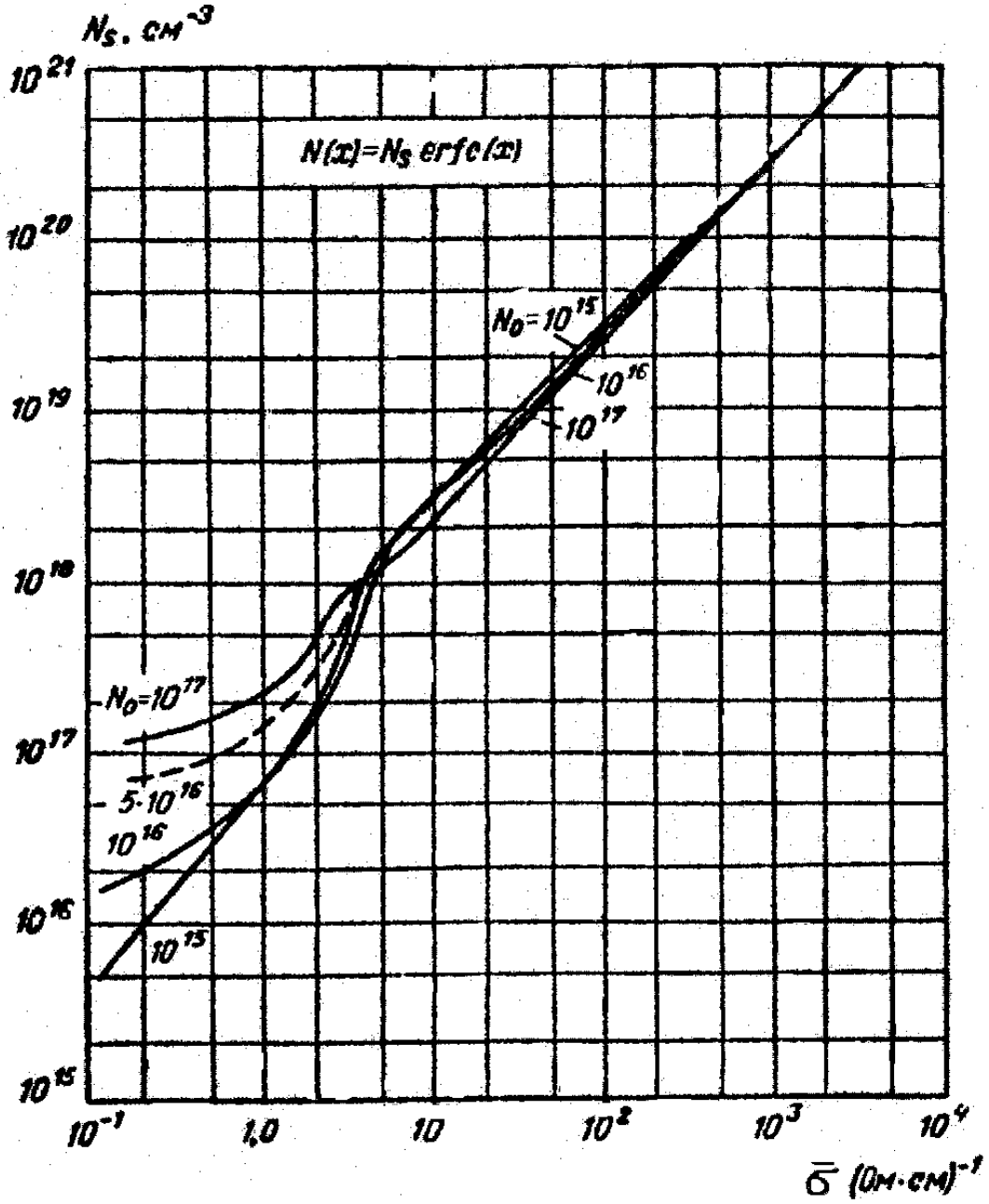


Рис. 6. Зависимость поверхностной концентрации от средней проводимости слоя для диффузии примеси р-типа в кремний из бесконечного источника

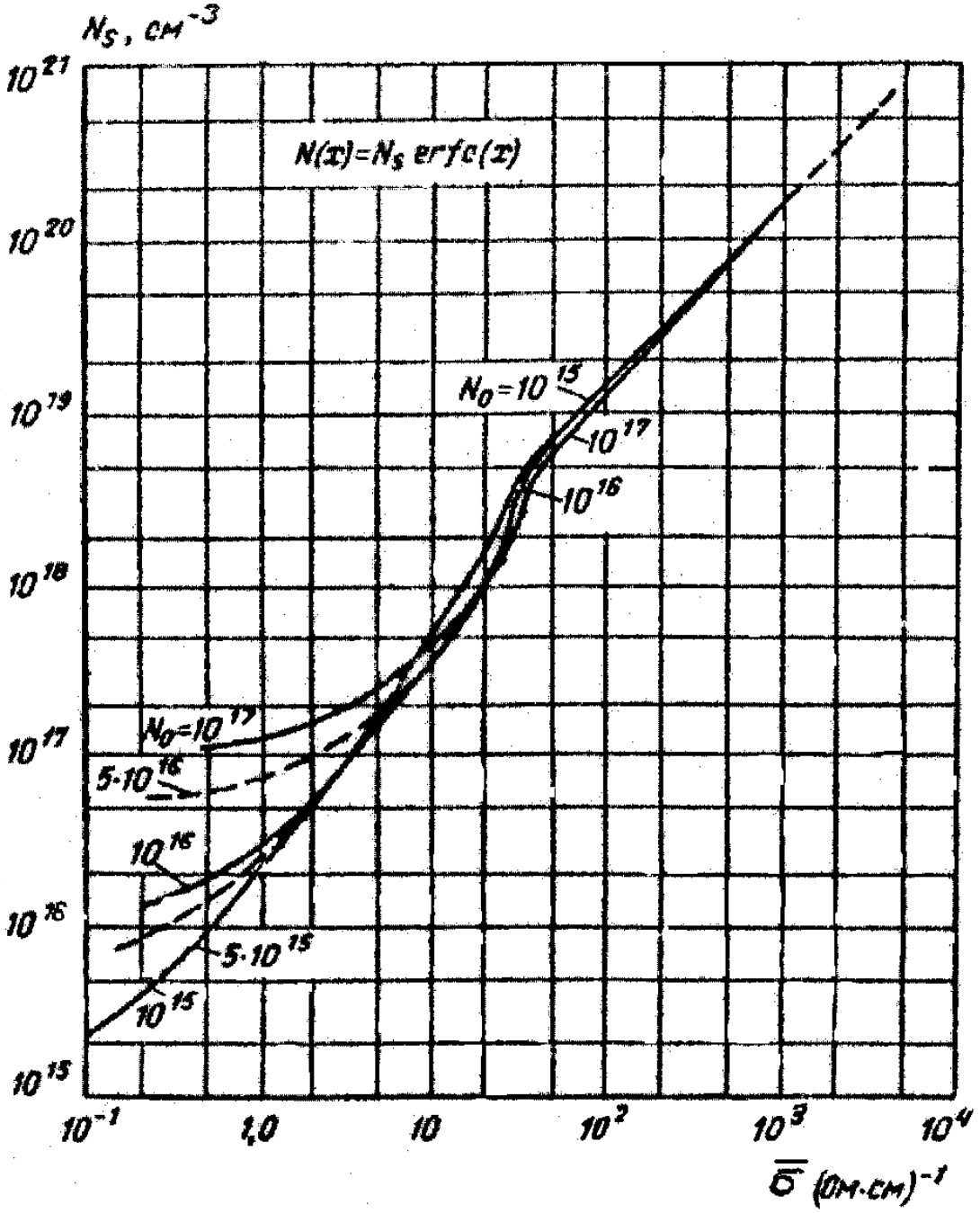


Рис. 7. Зависимость поверхностной концентрации от средней проводимости слоя для диффузии примеси n-типа в кремний из бесконечного источника

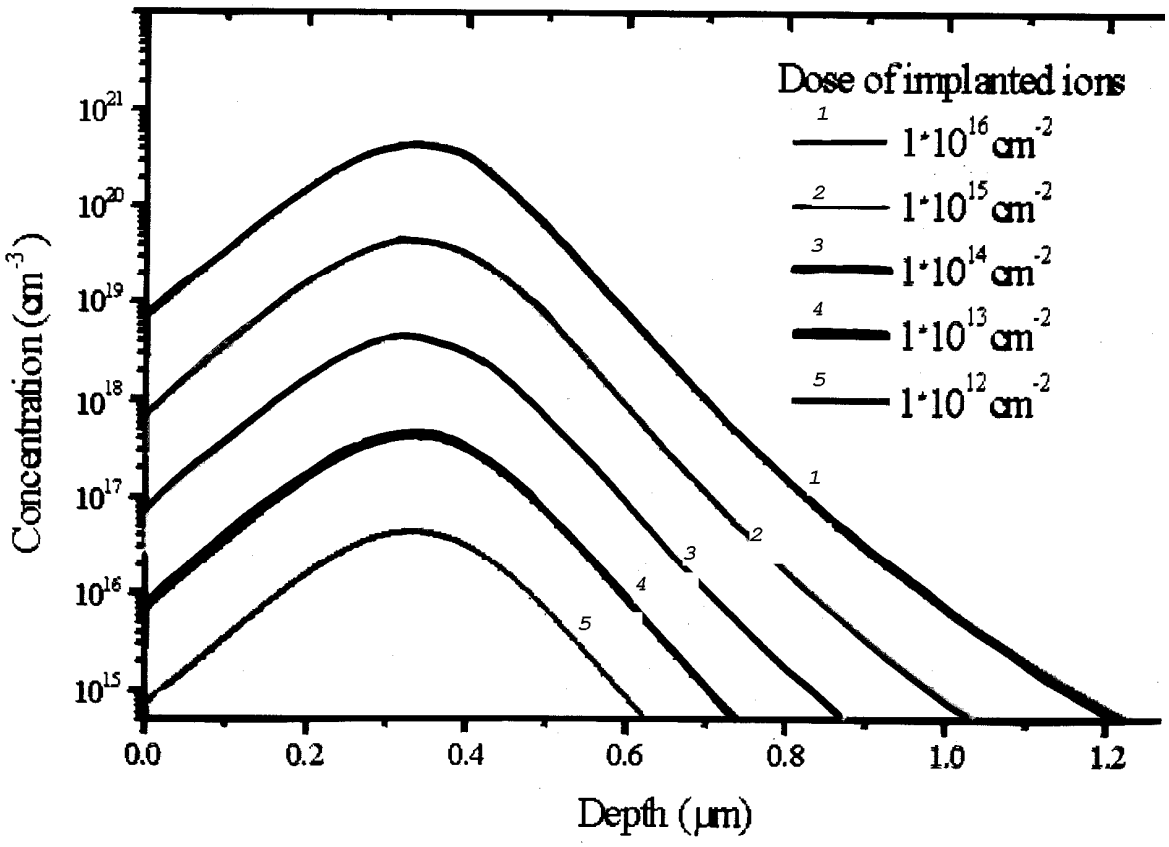


Рис. 8. Профиль примеси бора при энергии имплантируемых ионов 100 кэВ

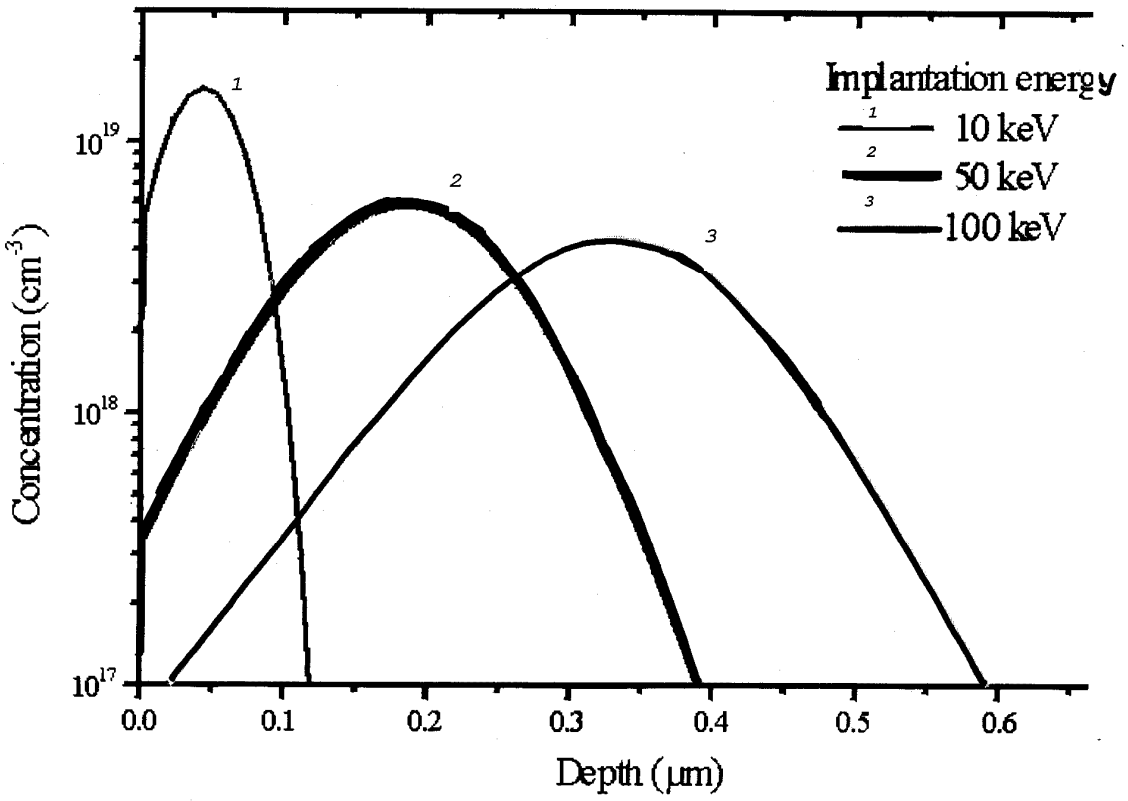


Рис. 9. Профиль примеси бора при дозе имплантации $1 \cdot 10^{14}$ см$^{-2}$

Оглавление

Задачи по теме 1 «Технология гибридных интегральных схем. Расчет параметров пленочных элементов» 4

Задачи по теме 2 «Диаграммы состояний. Эпитаксия. Процессы термического окисления кремния» 11

Задачи по теме 3 «Термическая диффузия. Ионная имплантация. Металлизация» 20

Рекомендуемая литература 27

Справочные материалы 28

Учебное издание

Физические основы технологии интегральных систем

Задачник

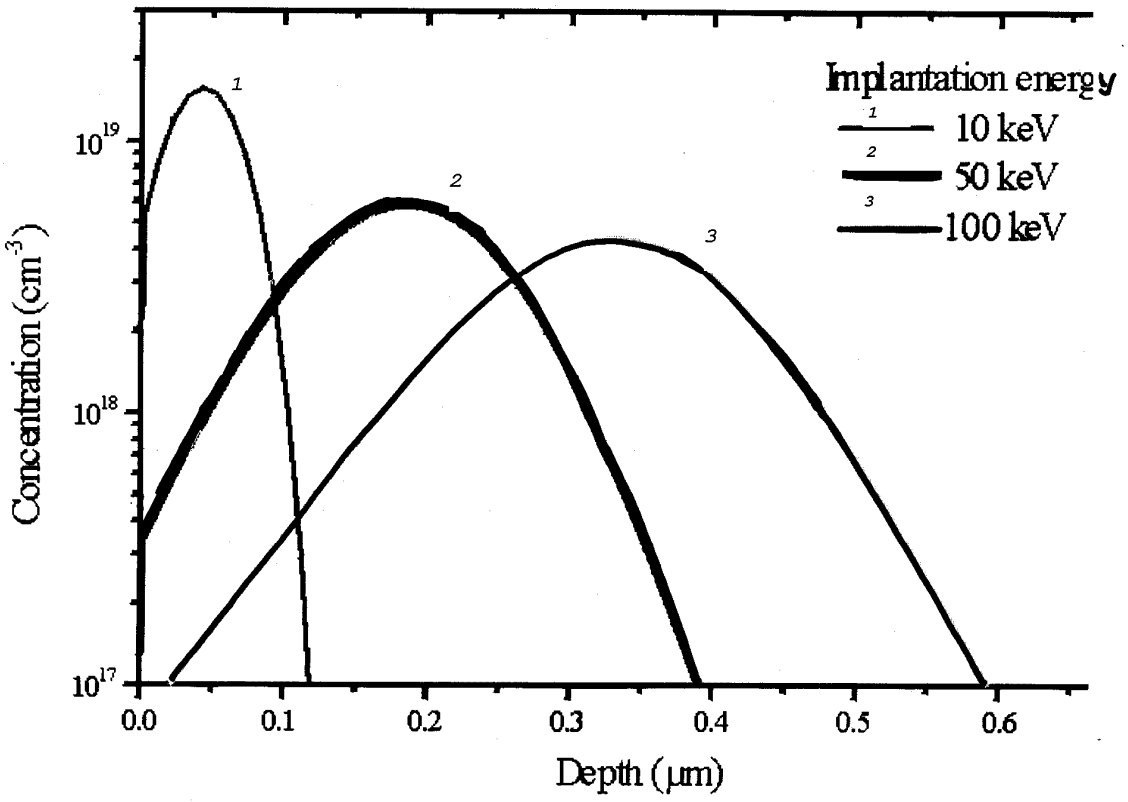
Составитель
Зимин Сергей Павлович

Редактор, корректор И.В. Бунакова
Компьютерная верстка Е.Л. Шелеховой

Подписано в печать 09.10.2008 г. Формат 60x84/16.
Бумага тип. Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 1,63.
Тираж 50 экз. Заказ .

Оригинал-макет подготовлен
в редакционно-издательском отделе ЯрГУ.

Отпечатано на ризографе.

Ярославский государственный университет.
150000 Ярославль, ул. Советская, 14.

Физические основы технологии интегральных систем