

МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ ПРИ БОМБАРДИРОВКЕ УСКОРЕННЫМИ ИОНАМИ

д.ф.-м.н., проф. А.К. Гнап, к.ф.-м.н. Н.М. Пелихатый, к.т.н. Н.Й. Коваленко,
к.ф.-м.н. Н.Я. Рохманов, Г.В. Прохоров

Приведены результаты изучения влияния бомбардировки кремния ионами бора и кремния на его микротвердость и трещинообразование. Измерения велись продавливанием слоев алмазным индентором при изменяющейся нагрузке. Показана роль электрически активных центров и точечных дефектов, образующихся при ионной бомбардировке.

Введение. Так как полупроводниковые элементы, полученные с использованием ионного легирования, используются в системах различных датчиков (датчики давления), в системах энергетического снабжения космических аппаратов, где они подвергаются воздействию космического пространства, в том числе освещенности, температурных напряжений, воздействия рабочих отходов, создающих ионизированную атмосферу вокруг космических станций, то изучение влияния механических напряжений представляет интерес как для теоретиков, так и для технологов-разработчиков изделий твердотельной электроники и контрольно-измерительных систем.

1. Микротвердость поверхностных слоев монокристаллов кремния после ионного легирования бором. Бомбардировка кристаллического материала быстрыми заряженными частицами приводит к повышению микротвердости в поверхностном слое, примерно, равном длине пробега заряженной частицы [1]. Исследование ионнолегированных полупроводниковых кристаллов обнаруживает сильное изменение электрофизических свойств в легированном слое, что обусловлено как внедрением примеси, так и образующимися при этом радиационными дефектами. Представляется интересным исследовать изменения микротвердости поверхностного слоя полупроводниковых кристаллов, вызванные ионным легированием.

Изучение микротвердости монокристаллов кремния n-типа с различной кристаллографической ориентацией поверхности производилось после легирования приповерхностных слоев ускоренными ионами В¹¹ с энергией 30, 40 и 100 кэВ до доз $10^{14} - 10^{18}$ ион·см⁻².

Для образцов с различной кристаллографической ориентацией наблюда-

лась анизотропия микротвердости: $H_{111} = 1030 \text{ кГ}\cdot\text{мм}^{-2}$ и $H_{110} = 980 \text{ кГ}\cdot\text{мм}^{-2}$. Наблюдаемое уменьшение микротвердости кремния n-типа по сравнению с микротвердостью той же плоскости (100) кремния p-типа, может быть объяснено влиянием типа и концентрации свободных носителей зарядов. Известно, что увеличение концентрации носителей ведет к изменению величины упругих постоянных полупроводника.

Измерения микротвердости, проведенные на образцах кремния с различными кристаллографическими ориентациями после легирования ионами бора, показали значительное ее увеличение в облученной части образцов. Ориентационная анизотропия микротвердости сохраняется и после ионного легирования. На кривых наблюдаются два характерных максимума с выходом на плато при нагрузках на индентор до 50 г (глубина нагружения индентора 1,3 мкм). При дальнейшем увеличении нагрузки на индентор величины микротвердости становятся близкими к измеренным при тех же нагрузках для необлученных образцов с теми же кристаллографическими ориентациями.

Для всех применяемых энергий ионов характерен сдвиг второго максимума на кривой $H = f(P)$ для образцов с ориентацией (110) по сравнению с образцами с ориентацией (111) в сторону больших глубин.

С возрастанием энергии бомбардирующих ионов (при одной и той же дозе облучения) происходит уширение максимумов, в особенности второго. Это связано с деканализированием ионов бора в процессе бомбардировки на образующихся радиационных дефектах и атомах вводимой примеси, которые "засоряют" каналы по мере увеличения дозы облучения.

Представляло интерес проследить зависимость микротвердости ионнолегированного слоя от дозы облучения при одной и той же энергии бомбардирующих ионов. С увеличением дозы легирующих ионов происходит смещение максимумов вглубь легированного слоя. По-видимому, существует критическое соотношение между концентрацией внедренной примеси и количеством дефектов, вводимых при ионном легировании, которое определяет расположение максимума микротвердости.

Рассмотрим возможные причины повышения микротвердости монокристаллов кремния при легировании приповерхностных слоев ионами бора.

Известно, что легирование кремния акцепторными примесями приводит к повышению предела текучести. На основании изучения температурно-временной зависимости верхнего предела текучести установлено, что акцепторные примеси увеличивают энергию дислокации в кремнии. Это в свою очередь, может вызвать уменьшение пластической деформации монокристаллов кремния при измерениях микротвердости.

Следует отметить, что ионным легированием в малый объем кри-

сталла ($V = 10^{-4} \text{ см}^3$) внедрялось 10^{18} атомов акцепторной примеси. В этом объеме кристалла находится 10^{20} атомов кремния. Повышение концентрации бора до $1 + 10\%$ приводит к набуханию приповерхностного слоя кристалла, что обнаруживается при электронномикроскопическом исследовании границы раздела облученная-необлученная области [2].

Приповерхностные слои монокристаллов кремния при ионном легировании, начиная с доз 10^{16} ион·см $^{-2}$, характеризуются сильным разупорядочением структуры, вплоть до образования мелкокристаллических и "аморфных" областей. Неравномерное распределение атомов внедренной примеси и радиационных дефектов по глубине легированного слоя приводит к механическим напряжениям и к сильному изменению микротвердости в слоях с повышенной их концен-

трацией, ибо твердые растворы бора в кремнии имеют более высокую микротвердость, чем чистый кремний.

Отжиг образцов кремния, легированных ионами бора с энергиями 30, 40 и 100 кэВ до доз 10^{18} ион·см $^{-2}$, в вакууме при температурах 100, 200, 400, 600, 700 и 800 °С в течение одного часа, как видно на кривых 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, приводит к общему падению величины микротвердости, особенно значительному в областях максимумов (рис. 1). На кривых $H = f(P)$, приведенных на рис. 2, наблюдаются две стадии отжига радиационных дефектов в ионнолегированных слоях кремния: первая вблизи температуры 200 °С, вторая – вблизи 600 °С.

Изучение микротвердости кремния, легированного ионами бора с энергией 30, 40 и 100 кэВ до доз $10^{14} - 10^{18}$ ион·см $^{-2}$,

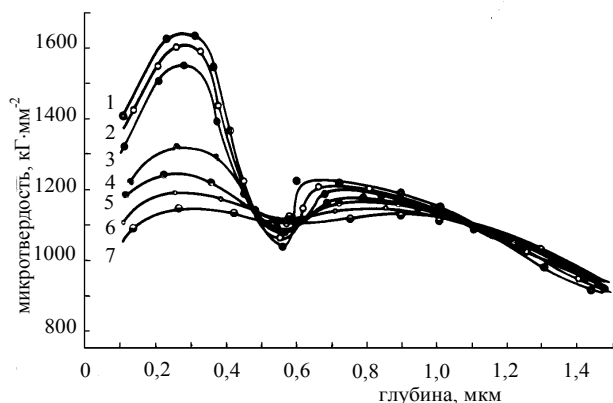


Рис. 1. Зависимость микротвердости от глубины (B^{11})

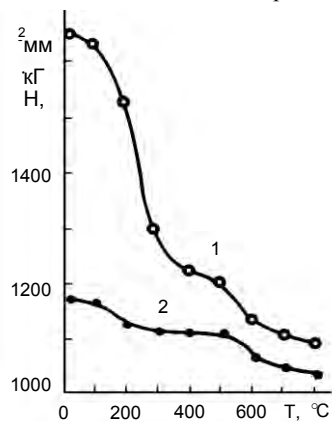


Рис. 2. Кривые $H = f(P)$, (B^{11})

позволило установить наличие двух характерных максимумов на кривых $H = f(P)$ (рис. 2). Первый максимум наблюдался на глубинах, равных местоположению максимума гауссовского распределения внедренных ионов бора в аморфный кремний, рассчитанного по теории Линдхарда, Шарфа [3]. Второй максимум объясняется распределением в этом слое проканализовавших ионов бора, и он расположен значительно глубже максимальной глубины проникновения ионов бора в кремний, рассчитанной по теории. В местах наибольшей концентрации внедренных ионов бора возможно не только образование твердого раствора, но, как показано электронномикроскопическими и микродифракционными исследованиями, возможно выпадение примесного бора в чистом виде или в виде химических соединений [2].

Выпадения, при достаточно больших размерах и значительной концентрации, могут образовывать прослойки с микротвердостью, значительно превышающей микротвердость чистого кремния и даже твердого раствора бора в кремнии.

2. Микротвердость кремния, легированного ионами кремния. Повышение микротвердости приповерхностных слоев монокристаллических образцов кремния при легировании ионами бора может быть обосновано введением атомов примеси и радиационными дефектами. Разделение этих дефектов весьма затруднительно, поэтому было решено изучить микротвердость приповерхностных слоев монокристаллов кремния после легирования ионами Si^{28} с теми же энергиями и до тех же доз, что при легировании ионами бора.

Как показано на рис. 3 (кривая 1), микротвердость приповерхностных слоев кремния n-типа с ориентацией (111) после бомбардировки ионами кремния с энергией 30, 40 и 100 кэВ возрастает по сравнению с микротвердостью необлученного кремния примерно так же, как и в случае бомбардировки ионами бора. Наблюдаются по два, а в случае бомбардировки 100 кэВ ионами три максимума. Выход на плато имеет место

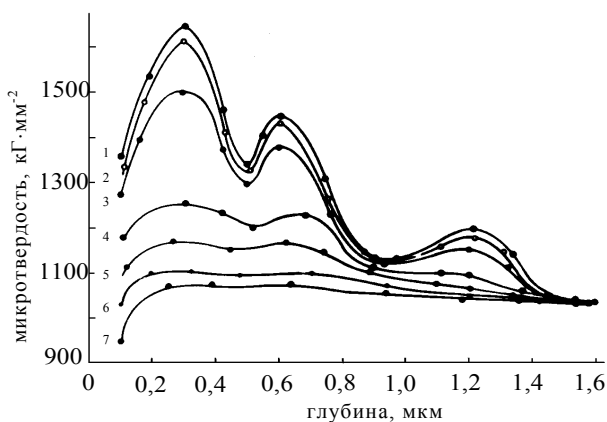


Рис. 3. Зависимость микротвердости от глубины (Si^{28})

при нагрузке 50 Г и выше (глубина погружения индентора 1,2 – 1,6 мкм), т.е. после продавливания ионнолегированного слоя и выхода в чистый объем кремния. При дальнейшем увеличении нагрузки на индентор величина микротвердости приближается к значению микротвердости необлученного кремния.

Расположение первого максимума на кривой $H = f(P)$ совпадает с расположением максимума гауссовского распределения внедренных ионов кремния в аморфный кремний, рассчитанного по ЛШШ. Второй максимум, так же как и в случае бомбардировки кремния ионами бора, может быть связан с ионами кремния, проникшими на значительную глубину в мишень по открытым каналам кристаллической решетки.

После изохронных отжигов облученных образцов в вакууме при температурах 100 – 800 °С в течение одного часа проводились измерения микротвердости при различных нагрузках на индентор, что позволило

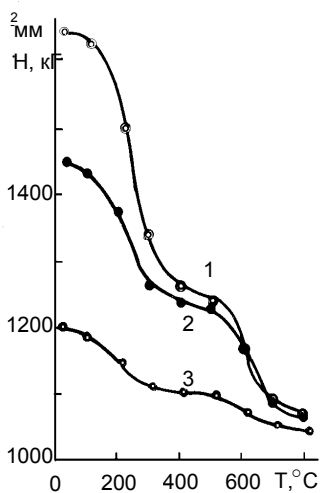


Рис. 4. Кривые $H = f(P)$, (Si^{28})

изучить слоевую микротвердость облученного слоя. Результаты этих измерений приведены в виде кривых 2 – 7 на рис. 3.

Повышение температуры отжига приводит к уменьшению микротвердости облученного слоя. Сравнение кривых $H = f(P)$, полученных при одинаковых температурах отжига для образцов, облученных ионами бора (рис. 1, 2) и ионами кремния (рис. 3, 4), обнаруживает различный характер влияния температуры отжига на микротвердость облученного слоя. Если в случае легирования ионами бора отжиг не приводит к полному восстановлению исходной микротвердости, то в случае бомбардировки ионами

кремния отжиг при 800 °С практически восстанавливает исходную микротвердость. В приповерхностных слоях наблюдается некоторое превышение микротвердости над исходным уровнем. Кроме того, измерение микротвердости самых подповерхностных слоев (при нагрузках на индентор 2 – 4 Г) обнаруживает совершенно различный характер. На образцах, облученных ионами бора после отжига при 800 °С, микротвердость подповерхностного слоя остается превышающей микротвердость необлученного кремния. На образцах кремния, облученного ионами кремния, наблюдается иная картина: микротвердость подповерхностного

слоя (при малых нагрузках на индентор) значительно ниже микротвердости в глубине образца при той же температуре отжига. Ход зависимости микротвердости от глубины погружения индентора подобен ходу зависимости микротвердости с глубиной на необлученных образцах кремния.

На кривых 1, 2, 3, приведенных на рис. 4, наблюдается, так же как и на образцах, легированных бором, две стадии отжига: первая – вблизи 200 °С, вторая – вблизи 600 °С. Обе стадии более низкотемпературные, чем в случае бомбардированного кремния бором.

Выводы. В результате изучения микротвердости и микропластичности приповерхностных слоев (1 – 2 мкм) показано увеличение микротвердости в области максимальной концентрации затормозившихся при ионной бомбардировке частиц. При этом большую роль играет ориентация бомбардируемых кристаллов по отношению к направлению входящего пучка ионов.

При отжиге определяющую роль играют тип внедренной примеси, образующиеся при этом химические соединения и электрические активные центры.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Технология СБИС: В 2-х кн. Кн. 1. Пер. с англ. / Под ред. С. Зи. – М.: Мир, 1986. – 453 с.*
2. *Залюбовский И.И., Пелихатый М.М., Коваленко Н.И., Гнап А.К. Физические процессы взаимодействия ионных потоков с материалами электронной схемой техники // Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна. Серія фізична “Ядра, частинки, поля”. – Х.: ХНУ. – 2001. – Вип. 3 (15), № 529. – С. 30 – 38.*
3. *Lindhart T., Nielsen V., Sharff M., Thomsen P. V. Integral equation governing radiation effects // Mat-medd. Kgl. dan. vid. selsk. – 1963. – V. 33, № 1. – P. 1 – 41.*

Поступила 14.05.2003

ГНАП Арлен Карпович, доктор физ.-мат. наук, профессор, профессор кафедры высшей математики и физики Харьковского национального аграрного университета. Окончил ХГУ в 1965 году. Область научных интересов – радиационное дефектообразование в элементах твердотельной электроники и его влияния на распространение сигналов.

ПЕЛИХАТЫЙ Николай Михайлович, кандидат физ.-мат. наук, ст. научн. сотр., зав. лаб. экспериментальной и радиолокационной физики ХНУ. Окончил в 1970 году радиофак ХГУ. Область научных интересов – радиофизика.

КОВАЛЕНКО Николай Иосифович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры высшей математики и физики Харьковского национального аграрного университета. Окончил ХГУ в 1971 году. Область научных интересов – радиофизика и электроника.

РОХМАНОВ Николай Яковлевич, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры физики ХНУ. Окончил физфак ХГУ в 1980 году. Область научных интересов – физика металлов.

ПРОХОРОВ Григорий Валерьевич, аспирант Украинской Национальной академии связи (Одесса). Область научных интересов – радиофизика и электроника.