

УДК 621.315.592

Формирование наноразмерных высоколегированных профилей бора в кремнии мощными ионными пучками

А. В. Войцеховский, А. Г. Коротаев, А. П. Коханенко
Сибирский физико-технический институт, г. Томск, Россия

Исследовалась возможность формирования сильнолегированных наноразмерных слоев бора в кремнии для варьирования высоты потенциального барьера на границе металл—полупроводник. Внедрение атомов бора в кремний проводилось методом ядер отдачи при воздействии пучками ионов алюминия с плотностью токов 4—10 А/см² и энергиями 30—150 кэВ. Анализ полученных структур методом вторичной ионной масс-спектрометрии (ВИМС) и измерения их электрических параметров свидетельствует о создании проводящего приповерхностного слоя толщиной порядка 10 нм и концентрацией носителей заряда более 10¹⁸ см⁻³.

Перспективность использования барьеров Шоттки на основе кремния для создания фотоприемников ИК-диапазона связана с возможностью снижения потенциального барьера на границе металл—полупроводник. Варьировать высоту потенциального барьера при конкретно заданных материалах можно путем создания на поверхности полупроводника тонкого слоя с другой концентрацией легирующей примеси. В данной работе для снижения эффективной высоты потенциального барьера предложено создавать на поверхности кремния *p*-типа проводимости высоколегированный наноразмерный слой с помощью внедрения атомов бора методом ядер отдачи.

Одно из новых направлений ионной имплантации — короткоимпульсная имплантация мощными ионными пучками. В работе [1] показано, что использование мощных ионных пучков с длительностями импульсов тока 10⁻⁷ с и средними скоростями набора дозы 10¹²—10¹³ см⁻² за один импульс, в отличие от имплантации непрерывными ионными пучками, приводит к одновременному с имплантацией непрерывным отжигу дефектов в структуре материала мишени. За времена воздействия ионного потока мгновенная скорость набора дозы достигает 10¹⁹+10²⁰ с⁻¹·см⁻². Числом импульсов и током ионов можно варьировать внедренную дозу, как при имплантации непрерывными пучками временем облучения. Получение подобных ионных пучков возможно только с энергиями ионов в десятки килоэлектрон-вольт, что делает короткоимпульсную имплантацию (как способ прямого внедрения примеси) неприемлемой для создания в приповерхностной области полупроводников высоколегированной зоны глубиной до 10 нм. Однако механизм имплантации отдачей из пленки, нанесенной на поверхность мишени, делает возможным использование сильноточных ионных пучков для создания узких легированных слоев в приповерхностной области полупроводников. Преимущества сильноточных ионных ускорителей: возможность получения ионных пучков любого сорта и большего сечения, высокая скорость набора дозы, возможность проведения отжига дефектов при имплантации — сохраняются и в этом случае.

Расчетная часть

Для оценки профилей глубинных распределений имплантированного бора проведены расчеты с использованием двух модельных приближений: одно-

столкновительного прямолинейного (SLOC-модель) и прямого аналогового (TRIM®).

В первом из приближений рассчитывались углы отдачи атомов бора, выбиваемых из пленки бора налетающими ионами (водорода, углерода, алюминия). По пробегу выбитого атома в пленке и углу его вылета определялись возможность пересечения им границы раздела пленка — подложка и, при положительном исходе, значение его энергии на этой границе. С учетом этой энергии определялись пробег атомов бора в кремнии и координата его остановки. Пробеги выбиваемых атомов бора в пленке и в подложке вычислялись программой TRIM®, в которой реализован численный метод решения задач прохождения частиц через вещество с помощью случайных испытаний (метод Монте-Карло). Рис. 1 и 2 показывают изменение концентрационного профиля бора в зависимости от типа и энергии падающих на пленку ионов. Видно, что с увеличением энергии ионов крутизна концентрационного профиля увеличивается, однако при этом в несколько раз уменьшается общий выход имплантируемых атомов. Так, для ионов углерода при увеличении энергии с 30 до 200 кэВ наблюдается уменьшение выхода в два раза, а для ионов алюминия в случае с толщиной пленки бора 20 нм — в четыре раза. С увеличением толщины пленки относительное количество столкновений, приводящих к пересечению границы низкоэнергетическими атомами бора, уменьшается, и наоборот, доля высокоэнергетических атомов бора, способных внедриться в подложку на большие глубины, увеличивается пропорционально толщине пленки. Анализ полученных результатов показал, что выход ядер отдачи ^{11}B в основном определен внесением энергии первичными ионами в области, близкой к границе $^{11}\text{B} - ^{27}\text{Si}$. Толщины пленки бора должны быть выбраны в диапазоне от 10 до 50 нм. При фиксированной энергии выход ядер отдачи ^{11}B зависит от дозы бомбардируемых ионов. Все эти выводы были учтены при проведении эксперимента.

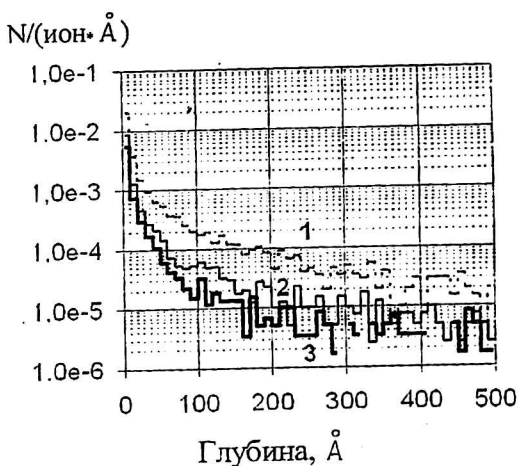


Рис. 1. Профили концентраций бора при облучении пленки бора толщиной 10 нм ионами углерода с энергиями: 30 кэВ (1); 100 кэВ (2); 200 кэВ (3)

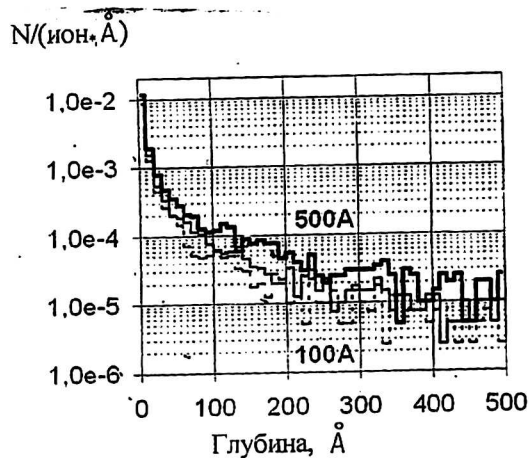


Рис. 2. Профили концентраций бора при облучении пленки бора ионами алюминия с энергией 30 кэВ

Методика эксперимента

Облучение пластин кремния с нанесенными слоями бора толщиной 10 нм проводилось ионами алюминия на сильноточном импульсном ускорителе, обеспечивающем генерацию пучков ионов с плотностью тока $4-10 \text{ А/см}^2$, энергией $30-150 \text{ кэВ}$. Пленка бора наносилась на поверхность кремниевых пластин типа КДБ-12 методом катодного распыления на постоянном токе. Формирование мощного ионного пучка основано на ускорении ионов из предварительно созданной взрывоэмиссионной плазмы [1]. Травление пленки бора после облучения проводилось в растворе царской водки. На облученных образцах осуществляли температурный отжиг в парах водорода в диапазоне $500-800 \text{ }^\circ\text{C}$. Профили бора определялись методом ВИМС. Для анализа использовался серийный прибор типа МС-7201 М, режим работы которого был оптимизирован применительно к данному типу структур. В качестве рабочего газа для создания пучка первичных ионов применялся либо чистый кислород, либо его смесь с аргоном.

Электрические параметры образцов кремния определялись с помощью неразрушающей бесконтактной радиоволновой методики [2], обеспечивающей высокую чувствительность и пространственное разрешение для материалов с удельным сопротивлением $10^{-3} \div 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$.

Результаты и обсуждение

Экспериментальные профили распределения примесных атомов бора по глубине подложки, внедренных в пластины кремния КДБ-12 методом ядер отдачи для различных доз облучения, представлены на рис. 3, 4. Число импульсов менялось от 5 до 500 (ионный поток $2 \cdot 10^{12} \text{ ион/см}^2$ в импульсе). Необходимо отметить, что для всех доз облучения от 10^{13} до 10^{15} ион/см^2 наблюдается качественно одинаковая картина распределения атомов бора по глубине: резкий спад на $100-150$ -й секундах травления, а потом — пологий “хвост”, уменьшающийся на всю исследуемую глубину. Медленное уменьшение концентрации внедренных атомов бора на глубине больше $200-400 \text{ с}$ травления ($5-10 \text{ нм}$) связывается в первую очередь с эффектом “кратера”, т. е. влиянием состава стенок (высокой концентрации бора в первых $1-3 \text{ нм}$) вытравленного углубления (“кратера”) на общую интенсивность вторичной ионной компоненты бора при анализе на больших глубинах (рис. 3).

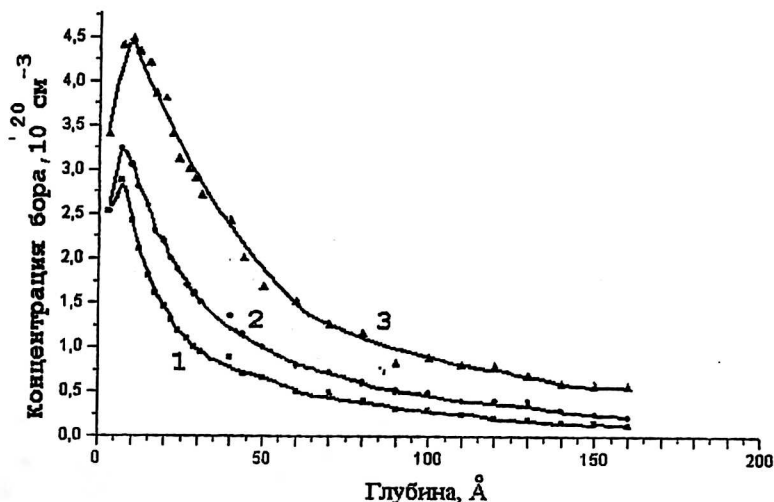


Рис. 3. Концентрационные профили распределения атомов бора в кремнии после облучения для различного числа импульсов:
1 — 5; 2 — 50; 3 — 500

Исследования вида профилей от числа импульсов воздействия не показали линейной зависимости величины концентрации бора в первом узком поверхностном слое (1 нм) от дозы облучения. Наблюдается насыщение абсолютных значений концентрации бора в этом слое с ростом числа импульсов. Отметим, что для всех исследованных образцов с ростом дозы облучения наблюдается уширение профилей распределения концентрации атомов бора. В первую очередь это можно связать с нагревом поверхностного слоя при мощном импульсно-пучковом воздействии. Подобное уширение профилей распределения концентрации атомов бора происходит и при проведении на облученных образцах отжига радиационных дефектов. Так, температурный отжиг при 550 °С в течение 10 мин приводит к существенному уширению профилей распределения концентрации атомов бора на образцах, подвергнутых воздействию 5 импульсами (10^{13} ион/см²). Вид профилей распределения концентрации атомов бора существенно изменяется и после проведения термического отжига. На рис. 4 представлены профили распределения концентрации атомов бора для образцов, подвергнутых отжигу при 800 °С. На кривых зависимости распределения профилей концентрации атомов бора от глубины наблюдается первоначальный спад и максимум — в районе 3—4 нм. Такое поведение бора в кремнии объясняется уже диффузионными процессами, определяющими движение атомов бора вглубь и сегрегацию бора вблизи поверхности.

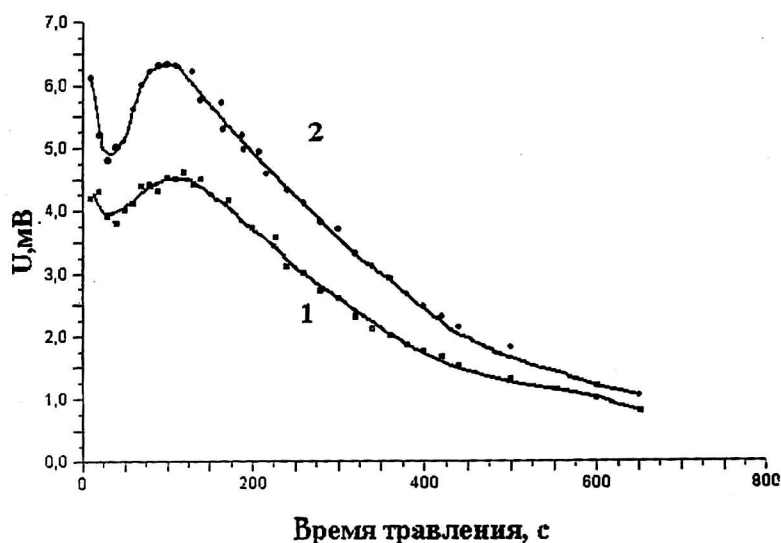


Рис. 4. Относительные профили распределения атомов бора в кремнии после облучения и отжига (800 °С; 30 мин) для различного числа импульсов: 1 — 5; 2 — 50

Результаты измерений электрических параметров образцов до облучения показали, что для них характерна неоднозначность в распределении удельного сопротивления ρ по площади образца. Разброс значений ρ составлял 5 % около среднего значения 12,05 Ом·см.

Результаты для образцов КДБ-12 после облучения и отжига приведены в таблице. Усредненные по площади образцов значения ρ составили 12,39—12,41 Ом·см, следовательно, облучение привело к уменьшению интегральной проводимости материала. Обработка полученных результатов с помощью

специально разработанной программы расчета параметров многослойных полупроводниковых структур Calvegy [3] показывает, что указанное изменение интегральной проводимости происходит за счет образования вблизи поверхности образцов высокоомного слоя толщиной 1—1,5 мкм и $\rho = 2,4 \cdot 10^2$ Ом·см. Этот слой, по-видимому, обязан своим происхождением радиационным нарушениям, образующимся в процессе имплантации.

Результаты измерений ρ для образцов КДБ-12 после облучения и отжига

Вид обработки	Значения					
	После облучения	12,55	12,45	12,40	12,44	12,33
Отжиг, 800 °С	11,83	11,83	11,83	11,83	11,83	11,83
После облучения	12,45	12,33	12,33	12,55	12,43	12,43
Отжиг, 800 °С	11,83	11,83	11,83	11,83	11,83	11,83
После облучения	12,55	12,40	12,40	12,26	12,52	12,55
Отжиг, 700 °С	11,81	11,82	11,82	11,82	11,82	11,82
После облучения	12,47	12,33	12,33	12,40	12,55	12,44
Отжиг, 700 °С	11,80	11,77	11,83	11,83	11,83	11,83

Как видно из таблицы, отжиг при различных температурах приводит к одинаковому увеличению интегральной проводимости образцов как относительно облученного, так и относительно исходного материала, при этом следует отметить повышение однородности распределения ρ по площади образцов. Обработка полученных данных по описанной выше программе свидетельствует об образовании вблизи поверхности материала проводящего слоя толщиной 10—15 нм с $\rho \sim 4 \cdot 10^{-2}$ Ом·см. Оценка для прямоугольного профиля распределения концентрации акцепторов толщиной 10 нм дает значение концентрации дырок порядка 10^{18} см⁻³.

Выводы

Внедрение ионов бора методом ядер отдачи с последующим отжигом позволяет получить высоколегированные слои в приповерхностной области кремния. При этом управление параметрами легированных слоев может осуществляться изменением дозы облучения ионами и температурой и длительностью послеимплантационного отжига. Профиль распределения имплантированных атомов бора зависит, главным образом, от полной дозы ионов Al и толщины пленки бора, но не зависит от начальной энергии бомбардирующих ионов, скорости набора дозы или температуры мишени в процессе имплантации.

Литература

1. Ремнев Г. Е., Исаков И. Ф., Опекунов М. С., Матвиенко В. М. Источники мощных ионных пучков для практического применения // Изв. вузов. Сер. Физика. 1998. Т. 41. № 4. С. 92—111.
2. Детшко М. В., Лисюк Ю. В., Медведев Ю. В., Скрыльников А. А. Бесконтактные радиоволновые методы измерения электрофизических параметров полупроводниковых материалов // Там же, 1992. Т. 35. № 9. С. 45—64.

Formation of boron heavily-doped nanolayer in silicon by powerful ion irradiation

A. V. Voitsekhovskii, A. G. Korotaev, A. P. Kokhanenko
Siberian Physico-Technical Institute, Tomsk, Russia

An opportunity of forming heavily doped boron layers in silicon is analyzed in this work for variation of potential barrier height on the metal—semiconductor interfaces. Implantation of boron atoms in silicon samples was made by recoil method, inducing Al ion beams bombardment with current density 4–10 A/cm² and 30–150 keV energy. An analysis of getting structures by SIMS and calculation of their electric parameters show the opportunity of conducting layers formation with a thickness of 10 nm and carrier concentration more than 10¹⁸ cm⁻³.