

ДВОЙНАЯ ИОННАЯ ИМПЛАНТАЦИЯ СУРЬМЫ И ФОСФОРА КАК МЕТОД СОЗДАНИЯ ТОНКИХ n^+ -СЛОЕВ В КРЕМНИИ

В.С.Соловьев, О.В.Мильчанин

НИИ прикладных физических проблем Белгосуниверситета, 220064, Минск, Курчатова, 7
Телефон: 2785116, e-mail: milchanin@rfe.bsu.unibel.by

Представлен метод получения бездефектных тонких n^+ слоев и мелкозалегающих (~ 210 нм) n^+/p переходов в Si. Метод включает в себя двойную имплантацию Sb^+ и P^+ (60 и 20 кэВ соответственно) с последующей стационарной термообработкой (до 850°C). Выбранные условия имплантации (доза, энергия) предполагают компенсацию напряжений несоответствия (КНН). Наблюдается значительно меньшее перераспределение фосфора и высокая степень активации легирующей примеси. Предполагается, что в условиях КНН участие собственных междоузельных атомов Si в процессах образования дислокационных петель и перераспределения примесей подавляется.

I. Введение

С переходом технологии кремниевых интегральных схем в субмикронный диапазон размеров элементов значение последовательного сопротивления приборных структур возрастает. К примеру, в комплиментарных "металл-оксид-полупроводник" (КМОП)-приборах при уменьшении сопротивления короткого канала даже малые паразитные сопротивления будут существенно ухудшать усиление по току в сравнении с данными масштабного пересчета параметров. Проблема дополнительно осложняется требованиями уменьшения толщины областей истока и стока для обеспечения воспроизводимости порогового напряжения, поскольку с уменьшением толщины неизбежно увеличивается сопротивление легированного слоя. Поэтому оптимальным компромиссом для таких приборных структур считается значение глубины залегания переходов около 0,2 мкм [1]. Ионная имплантация, вне сомнения, будет оставаться в обозримом будущем доминирующим методом легирования. В случае тонких слоев для уменьшения сопротивления необходимо поднимать концентрацию электрически активной примеси. В то же время необходимо добиваться минимального диффузионного перераспределения примеси при существующем одновременно требовании максимально полного отжига дефектов структуры в имплантационных слоях. Один из подходов к решению упомянутых проблем рассматривается в настоящей работе.

II. Основная часть

При создании тонких легированных слоев в Si методом ионной имплантации необходимо исключить эффект каналирования, для чего чаще всего используется предварительная аморфизация Si имплантацией неактивных ионов [2]. В наших исследованиях для предварительной аморфизации мы использовали имплантацию ионов Sb^+ , исходя из следующих соображений:

- ионы Sb^+ имеют большую массу, благодаря чему облегчается аморфизация слоя;
- имплантация Sb^+ технологически хорошо отработана;
- сурьма – легирующая донорная примесь, что хорошо вписывается в технологию создания n^+ -областей легированием основной донорной примесью – фосфором.

Еще одним аргументом в пользу создания тонких легированных слоев с помощью совместной (последовательной) имплантацией сурьмы и фосфора является следующее обстоятельство. Легирование одной примесью до больших ($>10^{19}$ см^{-3}) концентраций вызывает значительные напряжения несоответствия вследствие различия в ковалентных тетраэдрических радиусах атомов матрицы и примеси. Напряжения приводят к ряду нежелательных последствий, прежде всего, к генерации дефектов [2]. Деформация решетки кремния может быть вычислена [3] из уравнения

$$\epsilon = [1 + f(\Gamma^3 - 1)]^{1/3} - 1,$$

где f – атомная доля примеси, Γ – отношение ковалентных радиусов (по Паулингу) атомов растворенной примеси и кремния. Для фосфора это отношение составляет 0.932, для сурьмы – 1.15. Одновременное введение обеих этих примесей в определенной концентрации должно приводить при условии полной растворимости к компенсации напряжений. Для почти полной компенсации концентрация фосфора должна, как показывают оценки, в шесть с лишним раз превышать концентрацию сурьмы. В реальных же условиях необходимо принимать во внимание, прежде всего, растворимость примеси при температуре постимплантационной обработки. Кроме того, безусловно, желательно, чтобы в имплантационных или диффузионных слоях профили распределения примесей были близки.

На основании вышесказанного и с учетом значения температуры постимплантационной термообработки, в частности, при формировании исток-стоковых областей p -канальных МОП-транзисторов, были выбраны следующие условия имплантации:

- ионы Sb^+ : энергия 60 кэВ, доза $1.25 \cdot 10^{14}$ см^{-2} ;
- ионы P^+ : энергия 20 кэВ, доза $8.13 \cdot 10^{14}$ см^{-2} .

Последовательная имплантация Sb^+ и P^+ проводилась в окна различных размеров и конфигураций, сформированные на пластинах (001) Si марки КДБ-10 с помощью операций окисления и фотолитографии, сквозь пленку SiO_2 толщиной 16 нм. Термообработка в среде N_2 осуществлялась при 850°C в течение 30 минут, а также в варианте с предварительным отжигом при 550°C , 30 минут. В качестве исследовательских использовались



измерение эффекта Холла в сочетании с послойным травлением, резерфордовское обратное рассеяние (POP) ионов He^+ с энергией 1 МэВ, просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ).

Как видно из рис.1 рассчитанные с помощью программы TRIM-95 профили распределения радиационных дефектов достаточно удовлетворительно совпадают по форме и местоположению.

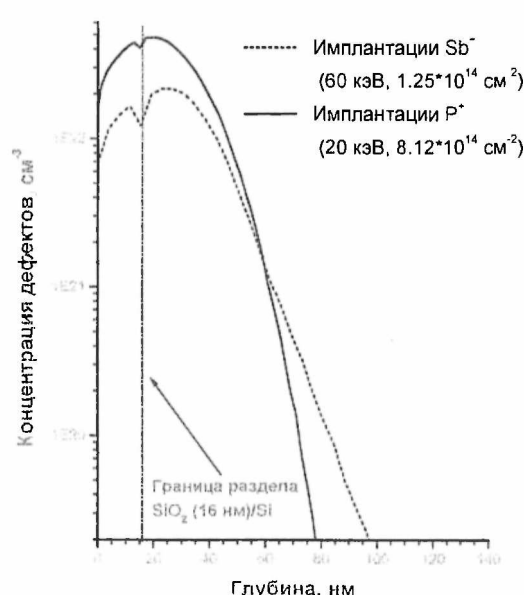


Рис.1. Расчетные профили распределения дефектов (смещений) после имплантации Sb^+ и P^+ .

Полагая, что для аморфизации Si количество смещенных атомов (при условии, что все дефекты устойчивы, а в случае имплантации Sb^+ это практически выполняется) должно составлять около 10% [2], можно оценить толщину аморфизованного имплантацией Sb^+ слоя: около 54 нм. Экспериментальные данные, полученные с помощью POP (рис.2), дают значения толщины аморфизованного двойной имплантацией Sb^+ и P^+ слоя (около 60 нм). С учетом дополнительной генерации дефектов при имплантации P^+ согласие следует признать весьма удовлетворительным. Таким образом, имплантация P^+ проводилась практически в аморфную мишень, что должно было исключить проявление эффекта каналирования.

Поскольку фосфор является наиболее мобильной донорной примесью в кремнии, можно ожидать, что именно его диффузионное перераспределение при термообработке будет определяющим. Экспериментальные профили распределения электрически активной примеси после имплантации и отжига (рис.3) свидетельствуют, однако, о значительно меньшем перераспределении на "хвостовых" участках по сравнению с тем, которого следовало бы ожидать с учетом концентрационной зависимости коэффициента

диффузии [4], и которое наблюдалось в случае имплантации только фосфора и термообработки

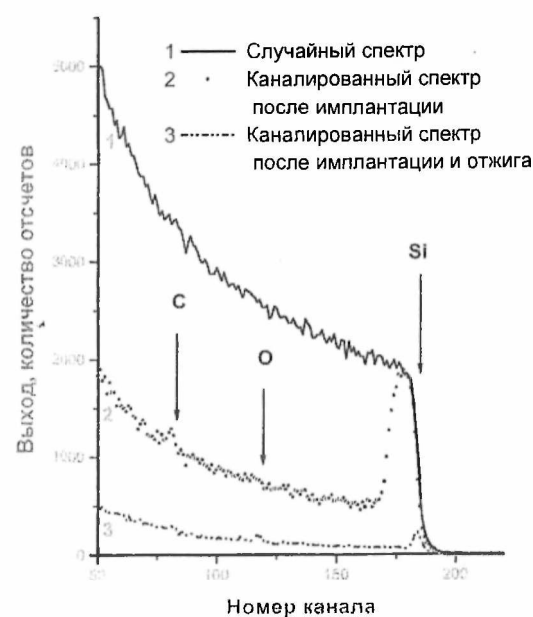


Рис.2. Спектры POP после имплантации и отжига.

даже при несколько меньшей (800°C) температуре [5]. В то же время перераспределение оказывается несколько больше расчетного вблизи исходной границы раздела аморфный слой / кристалл, где концентрация радиационных дефектов достаточно высока (рис.1). Хотя атомный механизм диффузии фосфора в Si остается предметом дискуссии, все чаще подчеркивается определяющая роль собственных междоузельных атомов (СМА) Si, особенно, в формировании "хвостовой" части распределения [6]. В нашем случае "хвост" выражен в гораздо меньшей степени, а форма "хвостового" участка свидетельствует о более быстром переходе к обычной диффузии. Таким образом, можно предполагать, что отжиг избыточных СМА, генерированных в процессе имплантации оказывается в данном случае более эффективным, чем при имплантации только фосфора. На это указывают также результаты POP-исследований: спектр POP каналированных ионов He^+ после отжига (рис.2) не отличается от такового для исходного кристалла. И, наконец, ПЭМ-исследования, в т.ч. в сочетании с послойным травлением, показали практически полное отсутствие протяженных дефектов структуры типа дислокационных петель (ДП) междоузельной природы.

Во всяком случае, можно утверждать, что их слоевая концентрация меньше 10^9 см^{-2} (предел обнаружения с помощью ПЭМ), в то время, как в случае имплантации только фосфора она превышает 10^{10} см^{-2} [5]. Это говорит о том, что уже на начальной стадии термообработки вследствие встраивания атомов Sb и P в узлы решетки происходит компенсация напряжений несоответствия. Таким образом, ликвидируются условия

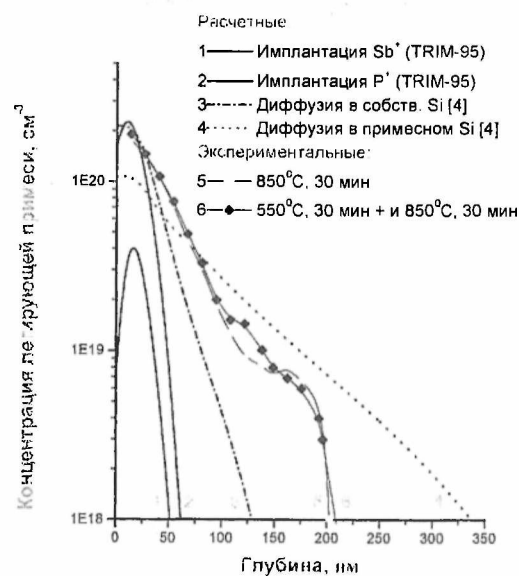


Рис. 3. Профили распределения примеси после имплантации и термообработки.

условия для зарождения и роста ДП, их перестройки с участием избыточных СМА, для которых ДП являются как стоками, так и источниками (при их сокращении). Мы полагаем, что в нашем случае основным стоком для СМА является граница раздела SiO_2/Si (термообработка проводилась без предварительного удаления SiO_2).

Форма "хвоста" распределения электрически активной примеси (рис.3) позволяет предположить наличие очень резкого n^+/p - перехода. Действительно, измерения глубины залегания перехода с помощью техники косого шлифа и

сканирующей электронной микроскопии показали, что она составляет около 210 нм. Следует отметить также достаточно высокий коэффициент использования примеси: 0.89 и 0.95 в случае одно- и двухступенчатого отжига соответственно.

III. Заключение

Двойная (последовательная) имплантация Sb^+ и P^+ с последующей термообработкой при относительно невысоких (до 850°C) температурах перспективна для создания тонких легированных n^+ слоев в Si. Компенсация напряжений несоответствия, обусловленных различием в тетраэдрических радиусах атомов матрицы и примесей, при соответствующем выборе условий имплантации (доза, энергия ионов) как предполагается, подавляет участие избыточных собственных междоузельных атомов Si в процессах образования протяженных дефектов структуры типа дислокационных петель и перераспределения примеси, в особенности, на "хвостах" профилей.

Список литературы

1. Hill Ch. // Nucl. Instr. Meth. - 1987. - В19/20. - Р.348.
2. Комаров Ф.Ф., Новиков А.П., Соловьев В.С., Ширяев С.Ю. Дефекты структуры в ионноимплантированном кремнии. - Мн.: Университетское. 1990. - 319 с.
3. Carruthers J.R., Hoffman R.B., Ashner J.D. // J. Appl. Phys. - 1963. - V.34. - Р.3389.
4. Fair R.B. Concentration Profiles of Diffused Dopants in Silicon, Wang F.F.Y. (ed), Impurity Doping Processes in Silicon, North-Holland, New York, 1981, ch.7.
5. Курьязов В.Д., Соловьев В.С., Ширяев С.Ю. // Междун. конф. по ионной имплантации в полупроводниках: Сб. докладов, Т.1. - Райнхардебунн (ГДР), 1977. - С.46.
6. Soleimani H.R. // J.Electrochem. Soc. - 1994. V.141. - Р.2182.

DOUBLE ION IMPLANTATION OF Sb^+ AND P^+ AS A METHOD FOR CREATING OF THE THIN n^+ -LAYERS IN Si

V.S.Solov'yev, O.V.Milchanin
Institute of Applied Physics Problems, Minsk, Belarus

A method for creating of thin defect-free n^+ -layers and shallow n^+/p junctions (~ 210 nm) in Si is presented. This technique includes double implantation of Sb^+ and P^+ (60 and 20 keV respectively) with the following stationary furnace annealing (up to 850°C). The implantation conditions (dose, energy) bring to compensation of misfit stress. The substantially smaller redistribution of phosphorus and high activation of dopand is established. We propose that in stress-relaxed conditions the influence self-interstitial Si atoms upon dopand redistribution and dislocation loops formation is suppressed.