

## ПОШАГОВЫЙ МЕТОД ИМПЛАНТАЦИИ КРЕМНИЯ ИОНАМИ БОРА ПРИ БЫСТРОМ ТЕРМИЧЕСКОМ ОТЖИГЕ

Ю. Б. Васильев<sup>1</sup>, В. И. Плебанович<sup>1</sup>, В. Б. Оджаев<sup>2</sup>, П. К. Садовский<sup>2</sup>,  
А. Р. Челядинский<sup>2</sup>, П. И. Гайдук<sup>2</sup>, С. Л. Прокопьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Интеграл», Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, [chelyadinski@bsu.by](mailto:chelyadinski@bsu.by)

### ВВЕДЕНИЕ

При ионной имплантации легирующих примесей в кремний образуется большое количество точечных дефектов решетки. Во время термообработки в имплантированных слоях кремния точечные радиационные дефекты перестраиваются в протяженные остаточные нарушения типа дефектов упаковки, дислокационных петель междоузельного типа. Они вносят глубокие уровни в запрещенную зону кремния и значительно ухудшают параметры полупроводниковых приборов и интегральных схем, а также снижают показатели выхода годных изделий микроэлектроники [1]. Образование остаточных нарушений в кремнии носит пороговый характер, и при пошаговой имплантации бора допороговой дозой ( $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) с промежуточными отжигами протяженные нарушения не образуются [2]. Авторами [3] был предложен метод пошагового ионного легирования кремния, в котором для уменьшения числа операций внедрения ионов и промежуточных отжигов эффект пороговой дозы совмещается с эффектом аннигиляции дефектов на примесях замещения, используя явление Воткинса. Положительный эффект достигался при термических отжигках в печи.

Целью данной работы было исследование влияния режимов промежуточных быстрых термических отжигов (БТО) на образование остаточных нарушений в легированных слоях кремния, созданных пошаговой имплантацией ионов бора.

### МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В работе исследованы пластины кремния, имплантированные ионами бора с энергией 60 кэВ дозами  $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  и  $1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  в 1, 3 и 4 шага. Ток ионов в сканирующем луче в процессе пошаговой имплантации составлял  $1 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$ . После каждого шага имплантации проводился БТО при  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  в атмосфере  $\text{N}_2$  с различной скоростью набора температуры. Отжиг производился на установке JetFirst100, температура пластин во время отжига контролировалась оптическим пирометром, направленным на обратную сторону пластины, и регистрировалась компьютером. Измерения электрической активации внедренной примеси после БТО проводились на установке по измерению эффекта Холла по методу Ван дер Пау. Структурные исследования легированных слоев проводились методом просвечивающей электронной микроскопии на электронном микроскопе ЭМ-125 при энергии электронов 75 кэВ. Подготовка образцов для исследования проводилась методом химической полировки пластин кремния в растворе кислот  $\text{HF} + \text{HNO}_3$ . Профили примеси бора после БТО определялись методом ВИС на установке САМЕСА IMS4F.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В таблице представлены результаты измерения слоевой концентрации носителей заряда и электрической активации примеси в исследованных образцах. Также в таблице показаны режимы имплантации и отжига пластин, где  $t_{up}$  – время набора температуры отжига,  $t_{max}$  – время отжига при  $T = 1000$  °С, Steps – шаги имплантации исходных пластин,  $\Phi$  – суммарная имплантированная доза бора и  $A$  электрическая активация внедренного бора. Из таблицы видно, что при использовании БТО в качестве промежуточного отжига пластин на всех образцах наблюдается практически полная электрическая активация внедренных примесей.

Таблица

**Результаты измерения слоевой концентрации носителей заряда и электрической активации в легированных слоях кремния**

Образец	$t_{up}$ , s	$t_{max}$ , s	Steps, $\text{cm}^{-2}$	$\Phi$ , $\text{cm}^{-2}$	$A$ , %
SiB-1	10	10	$1,5 \cdot 10^{15}$	$1,5 \cdot 10^{15}$	96
SiB-2	10	10	$(1+2+4+8) \cdot 10^{14}$	$1,5 \cdot 10^{15}$	100
SiB-3	15	15	$7 \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{14}$	100
SiB-4	15	15	$(1+2+4) \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{14}$	97
SiB-5	30	15	$(1+2+4) \cdot 10^{14}$	$7 \cdot 10^{14}$	100

На рисунке 1 и 2 представлены ПЭМ фотографии образцов кремния, легированного бором дозой  $1,5 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$  в один шаг (SiB-1) и в 4 шага (SiB-2), отожженных БТО при температуре 1000 °С в течение 10 секунд в атмосфере азота (время набора температуры 10 с). Из фотографий видно, что как при одношаговой, так и при пошаговой имплантации в легированном слое после отжига наблюдаются остаточные нарушения. В образце SiB-1 наблюдаются как дислокационные петли, так и стержнеобразные дефекты, что характерно для БТО с короткими временами отжига.

В отличие от пошаговой имплантации с применением термоотжига в печи [3], при применении промежуточных БТО положительный эффект подавления образования остаточных нарушений не достигается (рис. 1 и 2). Это может быть связано с высоким уровнем ионизации в имплантированном слое при нагреве в процессе БТО, вследствие чего подавляется эффект Воткинса. При термоотжиге в печи в диапазоне температур 500–600 °С, образующиеся при развале междоузельных комплексов атомы кремния, являющиеся источником остаточных дефектов, расходятся на вытеснение атомов бора вследствие эффекта Воткинса [3]. В случае же БТО при наборе температуры отжига 1000 °С за 10 с образовывались остаточные нарушения (рис. 2).



Рис. 1. ПЭМ фотография кремния, легированного бором в один шаг дозой  $1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Отжиг БТО в течении 10 секунд при  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  в  $\text{N}_2$  (SiB-1)

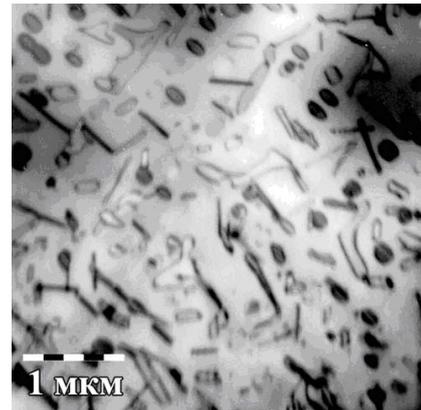


Рис. 2. ПЭМ фотография кремния, легированного бором в четыре шага дозой  $(1+2+4+8) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . Отжиг БТО в течении 10 секунд при  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  в  $\text{N}_2$  (SiB-2)

Влияние уровня ионизации в слое внедрения на эффективность процесса замещения по Воткинсу подтверждается исследованиями электрической активации имплантированного бора в процессе изохронного отжига (рис. 3). Характерная стадия «обратного» отжига на кривой активации примеси в температурном интервале  $500\text{--}600 \text{ }^\circ\text{C}$  (кривая 1), обусловленная вытеснением бора из узлов решетки междоузельными атомами Si, образующимися при развале комплексов Si-B3, отсутствует в случае подсветки имплантированного слоя электронами с энергией 10 кэВ при плотности тока электронов  $5 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$  (кривая 2).

Для уменьшения уровня ионизации в слое при БТО в процессе отжига была создана «полка» при  $T = 500 \text{ }^\circ\text{C}$  (отжиг междоузельных комплексов), а также увеличено время набора конечной температуры отжига  $T = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$  до 15 и 30 секунд (рис. 4).

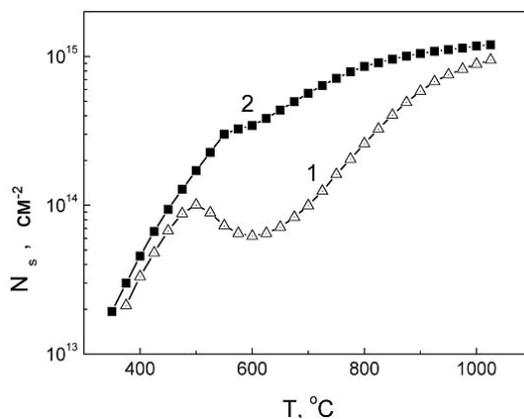


Рис. 3. Кривые электрической активации имплантированного бора в слоях кремния: 1 – без подсветки электронами; 2 – с подсветкой электронами с энергией 10 кэВ при плотности тока электронов  $5 \text{ мкА} \cdot \text{см}^{-2}$

На рисунке 5 представлены ПЭМ фотографии образцов кремния, легированного бором дозой  $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  в один шаг (SiB-3) и в 3 шага (SiB-4 и SiB-5), отожженных БТО при температуре  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  в течение 10 секунд в атмосфере азота (скорость набора температуры отжига 15 и 30 с). Положительный эффект пошаговой имплантации заключается в уменьшении плотности остаточных нарушений по сравнению со слоями, имплантированными в один шаг (SiB-3). Однако полного подавления образования остаточных нарушений, как в случае от-

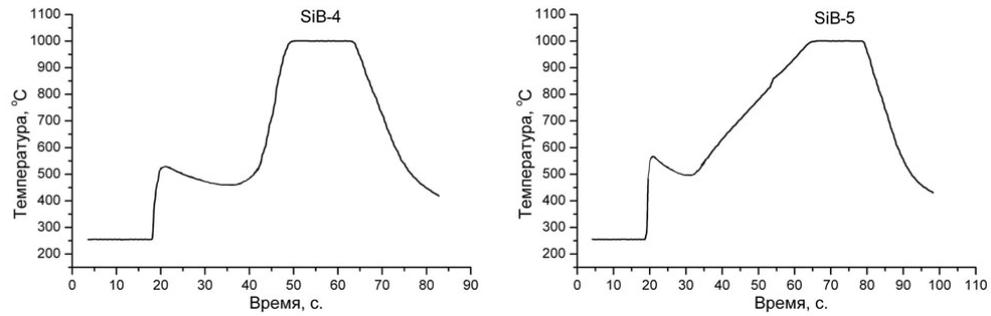


Рис. 4. Графики зависимости температуры отжига пластин SiB-4 и SiB-5 от времени при БТО ( $\Phi = 7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ).

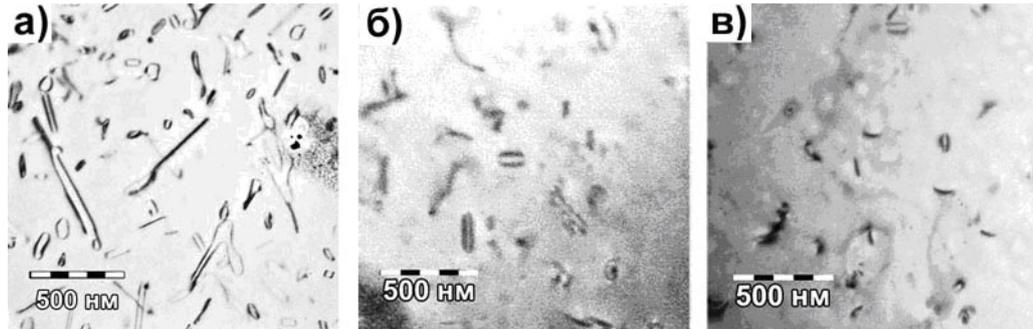


Рис. 5. ПЭМ фотографии слоев кремния, легированных бором:  
а – в один шаг дозой  $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (SiB-3); б, в – в три шага дозой  $(1+2+4) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (SiB-4 и SiB-5).  
Отжиг БТО в течении 15 секунд при  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  в  $\text{N}_2$

жиг в печи [3], не наблюдается. При дозе  $1,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  слоевая плотность дефектов при одношаговой имплантации и последующем БТО составила  $1,5 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ , а при имплантации в четыре шага той же дозой  $(1+2+4+8) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  плотность дефектов почти в три раза ниже ( $0,6 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$ ). Аналогичный результат наблюдался и для дозы  $7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$  с той разницей, что плотности дефектов в данном случае меньше ( $3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$  и  $1 \cdot 10^9 \text{ см}^{-2}$ ).

Данные ПЭМ позволяют сделать вывод о том, что даже при наличии «полки» при наборе температуры и увеличении времени набора конечной температуры, ионизация в слое при БТО остается достаточно высокой, чтобы подавить замещения атомов бора междоузельными атомами кремния вследствие эффекта Воткина.

При создании сильнолегированных каналов МОП-транзисторов актуальным вопросом является ускоренная диффузия бора в процессе термического отжига. Учитывая то, что при пошаговой имплантации в 3 или 4 шага суммарное время отжига пластины увеличивается, была исследована диффузия атомов бора при пошаговой имплантации с применением БТО.

На рисунке 6 представлены профили бора, полученные методом ВИМС, в образцах SiB-1 и SiB-2 после проведения БТО. Как видно из рисунка, профили бора при

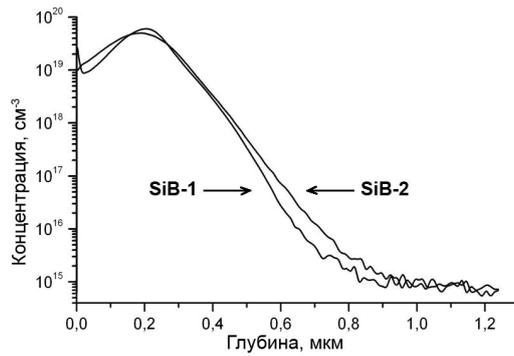


Рис. 6. Профили распределения бора в кремнии после БТО ( $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 10 с). Имплантация дозой  $1,5 \cdot 10^{15}\text{ см}^{-2}$  в один шаг (SiB-1) и дозой  $(1+2+4+8) \cdot 10^{14}\text{ см}^{-2}$  в четыре шага (SiB-2)

имплантации в один шаг и в четыре шага практически совпадают, несмотря на различные длительности отжига.

Результаты можно объяснить, если предположить, что ускоренная диффузия бора протекает по комплексу междоузельный атом бора – междоузельный атом кремния ( $\text{B}^i\text{-Si}^i$ ). Для ускоренной диффузии необходим избыток междоузельных атомов кремния. Оценка коэффициента диффузии  $D$  по расчетному исходному и конечному профилям дает значение  $D = 7 \cdot 10^{-12}\text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ , в то время как равновесный коэффициент диффузии для данной концентрации бора в кремнии  $D_e = 2 \cdot 10^{-13}\text{ см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$ .

При пошаговом легировании полная концентрация примеси достигается только при последнем шаге имплантации. При этом, концентрация радиационных дефектов будет ниже, чем при имплантации за один шаг. Меньшее количество образующихся комплексов  $\text{B}^i\text{-Si}^i$  через которые осуществляется диффузия бора в кремнии, компенсирует большее суммарное время диффузии при пошаговой имплантации.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе установлено, что при пошаговом методе имплантации ионами бора с применением БТО не достигается полное подавление образования нарушений (дислокационных петель) в легированном слое кремния. Это объясняется оптической ионизацией в имплантированном слое при проведении БТО, вследствие чего подавляется эффект Воткинса вытеснения междоузельными атомами кремния атомов бора из узлов решетки. Также установлено, что профили диффузии бора при пошаговой имплантации и БТО практически не отличались от случая одношаговой имплантации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Челядинский, А. Р. Дефектно-примесная инженерия в имплантированном кремнии / А. Р. Челядинский, Ф. Ф. Комаров // УФН. 2003. Т. 173. № 8. С. 813.
2. Schrentelkamp, R. J. Pre-amorphization damage in ion-implanted silicon / R. J. Schrentelkamp [et al.] // Mater. Sci. Rep. 1991. V. 6. P. 275.
3. Плебанович В. И., Белоус А. И., Челядинский А. Р., Оджаяев В. Б. // Доклады НАН Беларуси. – 2006. Т. 50. № 6. С. 47.