

## СОВМЕСТНАЯ С ИОНАМИ $BF_2^+$ ИМПЛАНТАЦИЯ УГЛЕРОДА ПРИ СОЗДАНИИ $P^+$ - $N$ -ПЕРЕХОДОВ В КРЕМНИИ

О.В. Мильчанин<sup>1)</sup>, Ф.Ф. Комаров<sup>1)</sup>, В.И. Плебанович<sup>2)</sup>, А.Ф. Комаров<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> НИИПФП им. А.Н. Севченко БГУ, ул. Курчатова 7, 220064 Минск, Беларусь, Тел: +375 17 2785116; e-mail: milchanin@tut.by

<sup>2)</sup> Завод полупроводниковых приборов НПО «Интеграл», пл. Казинца 1, 220108 Минск, Беларусь, Тел: +375 17 2782901; e-mail: dz\_prod@integral.by

Использованы режимы совместной с ионами  $BF_2^+$  имплантации углерода и ступенчатых термообработок (в том числе режим быстрого термического отжига) для минимизации эффекта неравновесной ускоренной диффузии атомов бора в кремнии. Совместная с ионами  $BF_2^+$  имплантация ионов  $C^+$  позволяет уменьшить глубину залегания формируемого при последующей термообработке  $p^+$ - $n$  перехода на  $\sim 70$  нм. Использование режима быстрого термического отжига приводит к улучшению параметров формируемых мелких  $p^+$ - $n$  переходов в кремнии: увеличение поверхностной концентрации электрически активной примеси, увеличение степени активации легирующей примеси, снижение слоевого сопротивления.

### Введение

В имплантированном кремнии диффузия легирующих примесей при термообработках может быть аномально быстрой и приводить к увеличению глубины залегания конечных профилей на десятки и даже сотни нм [1]. Это явление неравновесной ускоренной диффузии (НУД) легирующей примеси объясняется взаимодействием примесей с собственными междоузельными атомами (СМА) кремния и с вакансиями, которые формируются в большой концентрации при имплантации. Эффект неравновесной ускоренной диффузии характерен для примесей, способных передвигаться в Si по междоузельному механизму, и поэтому имеющих диффузионную способность пропорциональную концентрации СМА кремния [2]. Избыточные СМА вытесняют легирующую примесь из замещающих положений в решетке, формируя подвижные комплексы, типа «атом примеси» – «междоузельный атом кремния». Эффект неравновесной ускоренной диффузии, в той или иной степени, наблюдается для всех легирующих примесей, но наиболее он выражен для атомов бора, что является основной технологической проблемой.

На сегодняшний день, при создании мелких переходов традиционная технология легирования получает развитие за счет использования низкоэнергетичной ионной имплантации (в диапазоне энергий 100 эВ – 5 кэВ), имплантации ионов тяжелых молекул (к примеру  $BF_2^+$ ,  $BF_3^+$ ,  $B_{10}H_{14}^+$  и т.д.), комбинированных режимов термообработки с использованием быстрого термического отжига (БТО) [3]. Перспективными выглядят и подходы связанные с применением предварительной аморфизации слоев кремния перед легированием ионами Si или Ge [4], имплантации легирующих примесей с высокой скоростью набора дозы (плотность тока выше 20 мкА/см<sup>2</sup>), ультрабыстро нагрева при БТО [5]. Особо нужно выделить и использование режимов совместной с легирующей имплантации других примесей (N, C, Ge), которые значительно подавляют эффект неравновесной ускоренной диффузии [6, 7].

В данной работе использованы режимы совместной с ионами  $BF_2^+$  имплантации ионов углерода и ступенчатых термообработок (в том числе режим быстрого термического отжига) с целью

минимизации эффекта неравновесной ускоренной диффузии атомов бора, а также для снижения дефектности кристаллической структуры кремниевой матрицы.

### Методика эксперимента

Имплантация ионов  $BF_2^+$  (20 кэВ,  $5 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>) в пластины кремния  $n$ -типа проводимости проводилась как отдельно, так и совместно с ионами  $C^+$  (20 кэВ,  $4 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup> или 30 кэВ,  $5 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>). Для отжига имплантированных слоев в инертной среде использовались следующие режимы термообработок: 1) 850°C – 60 мин; 2) 600°C – 60 мин, 1000°C – 2 мин; 3) 600°C – 60 мин, 1000°C – 2 мин, 850°C – 60 мин.

Профили электрически активного бора определялись методикой измерения слоевого сопротивления и эффекта Холла в сочетании с прецизионным снятием тонких слоев кремния. Для анализа структурных свойств образцов использовался метод просвечивающей электронной микроскопии.

### Результаты и обсуждение

На рис. 1 представлены результаты измерений профилей электрически активного бора в экспериментальных образцах, содержащих мелкозалегавшие  $p^+$ - $n$  переходы в кремнии. При использовании стандартной печной термообработки (850°C – 60 мин), имплантированных ионами  $BF_2^+$  (20 кэВ,  $5 \times 10^{14}$  см<sup>-2</sup>) слоев кремния, глубина залегания формируемых  $p^+$ - $n$  переходов составляет  $\sim 0,3$  мкм (см. рис.1 – кривая 1). Достаточна большая глубина залегания  $p$ - $n$  перехода и пологий спад «хвостовой» части профиля обусловлен эффектом неравновесной ускоренной диффузии атомов бора в кремнии. Использование дополнительной термообработки в сочетании с режимом быстрого термического отжига позволяет существенно уменьшить влияние эффекта НУД бора и получить  $p$ - $n$  переход с меньшей глубиной залегания (кривая 2 на рис.1) и лучшими электрофизическими параметрами (см. таблица 1). В этом случае глубина  $p$ - $n$  перехода уменьшается на  $\sim 100$  нм, но при этом слоевое сопротивление имеет меньшее значение при большей слоевой концентрации электрически активной примеси. На рис. 2-3 представлены результаты измерений

профилей электрически активного бора в экспериментальных образцах, содержащих мелколзалегающие  $p^+-n$  переходы в кремнии, формируемые с использованием совместной с ионами  $BF_2^+$  имплантации ионов углерода.

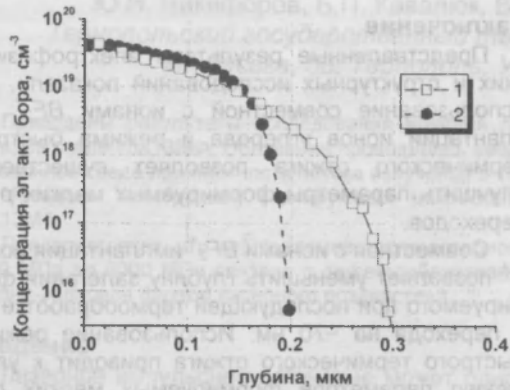


Рис. 1. Профили электрически активного бора в  $p^+-n$  переходах, сформированных имплантацией ионов  $BF_2^+$  (20 кэВ,  $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) и последующего отжига в среде  $N_2$ :  
1)  $850^\circ\text{C}$  - 60 мин (кр. 1).  
2)  $600^\circ\text{C}$  - 60 мин;  $1000^\circ\text{C}$  - 2 мин;  $850^\circ\text{C}$  - 60 мин (кр. 2).

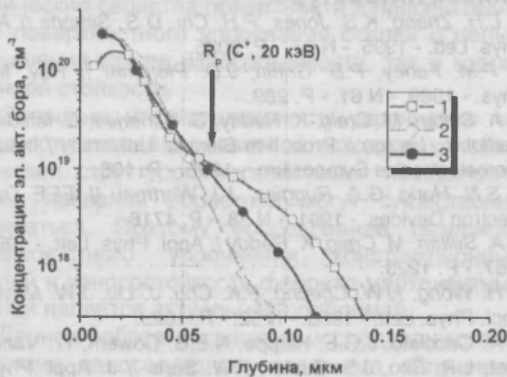


Рис. 2. Профили электрически активного бора в  $p^+-n$  переходах, сформированных имплантацией ионов  $BF_2^+$  (20 кэВ,  $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) и  $C^+$  (20 кэВ,  $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ), а также последующего отжига в среде  $N_2$ :  
1)  $850^\circ\text{C}$  - 60 мин (кр. 1).  
2)  $600^\circ\text{C}$  - 60 мин;  $1000^\circ\text{C}$  - 2 мин (кр. 2).  
3)  $600^\circ\text{C}$  - 60 мин;  $1000^\circ\text{C}$  - 2 мин;  $850^\circ\text{C}$  - 60 мин (кр. 3).

Было установлено:

- Использование совместной с ионами  $BF_2^+$  имплантации ионов  $C^+$  и стандартной одностадийной термообработки позволяет получать более мелкие  $p^+-n$  переходы и с лучшими электрическими параметрами (см. таблица 1). Глубина залегания  $p^+-n$  переходов уменьшается более чем на 110 нм и составляет  $\sim 0,17$  мкм.

- Использование дополнительной термообработки в сочетании с быстрым термическим отжигом также приводит к улучшению параметров формируемых (с использованием совместной имплантации ионов углерода) мелких  $p^+-n$  переходов. Глубины залегания переходов уменьшаются на  $\sim 15$  нм и составляют  $\sim 0,14$  мкм. Можно отметить и «платоподобную» форму профилей

бора в этом случае (рис. 3 - кривая 3), что также является свидетельством более качественного перехода.

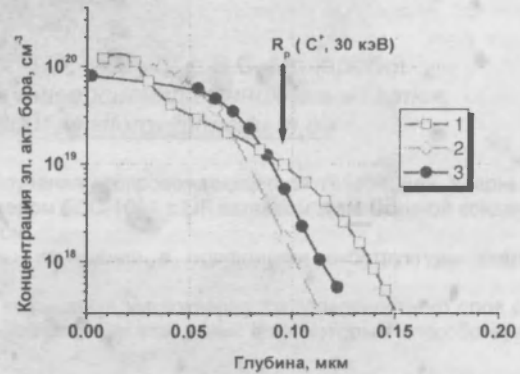


Рис. 3. Профили электрически активного бора в  $p^+-n$  переходах, сформированных имплантацией ионов  $BF_2^+$  (20 кэВ,  $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) и  $C^+$  (30 кэВ,  $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ), а также последующего отжига в среде  $N_2$ :

- 1)  $850^\circ\text{C}$  - 60 мин (кр. 1).
- 2)  $600^\circ\text{C}$  - 60 мин;  $1000^\circ\text{C}$  - 2 мин (кр. 2).
- 3)  $600^\circ\text{C}$  - 60 мин;  $1000^\circ\text{C}$  - 2 мин;  $850^\circ\text{C}$  - 60 мин (кр. 3).

Таблица 1. Слоевые сопротивления и слоевые концентрации электрически активной примеси в  $p^+-n$  переходах в зависимости от режимов формирования

Режимы обработки образцов		Отжиг		$R_s$ , Ом/	$N_s$ , $\cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$
Имплантация	$C^+$	T, $^\circ\text{C}$	t, мин		
20 кэВ, $5 \cdot 10^{14}$	-	850	60	450	3.81
20 кэВ, $5 \cdot 10^{14}$	-	600	60	421	4.20
		1000	2		
		850	60		
20 кэВ, $5 \cdot 10^{14}$	20 кэВ, $5 \cdot 10^{14}$	850	60	448	4.38
20 кэВ, $5 \cdot 10^{14}$	20 кэВ, $5 \cdot 10^{14}$	600	60	400	4.95
		1000	2		
		850	60		
20 кэВ, $5 \cdot 10^{14}$	30 кэВ, $5 \cdot 10^{14}$	850	60	456	4.59
20 кэВ, $5 \cdot 10^{14}$	30 кэВ, $5 \cdot 10^{14}$	600	60	380	4.93
		1000	2		
		850	60		

- Из сравнения кривых 2 на рис. 1 и 3 на рис. 2 и 3 видно, что для образцов отжигаемых в аналогичных режимах (с использованием дополнительной в сочетании с БТО термообработки), наблюдается уменьшение глубины залегания  $p^+-n$  перехода на  $\sim 70$  нм при использовании дополнительной имплантации углерода. Вместе с тем, при меньшей глубине залегания  $p^+-n$  перехода наблюдается большая поверхностная концентрация активной примеси, а также более высокая степень активации бора и меньшее слоевое сопротивление  $p^+$ -области перехода.

На рис. 4 представлены результаты ПЭМ-исследований поверхностных слоев  $p^+-n$  переходов, сформированных после имплантации ионов  $BF_2^+$  (а также и ионов  $C^+$ ) и ступенчатой термооб-

работки в сочетании с режимом быстрого термического отжига.

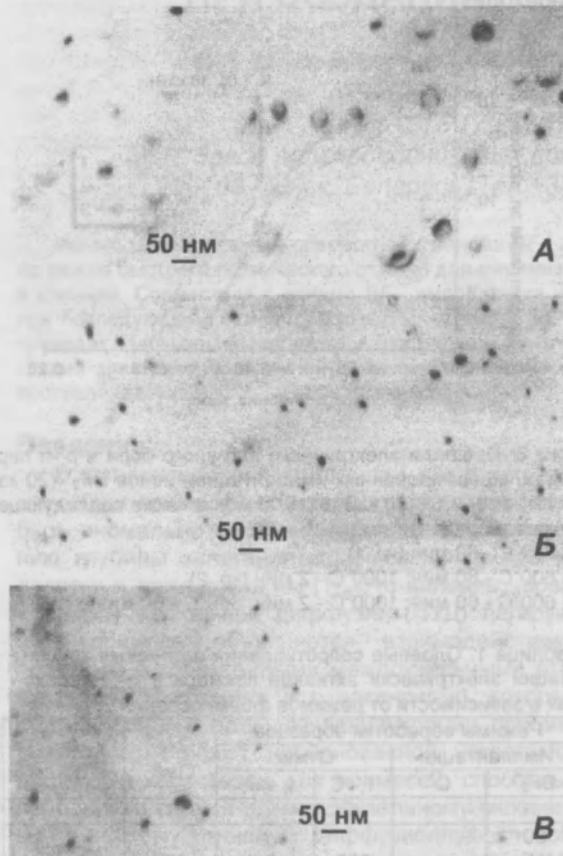


Рис. 4. Светлопольные ПЭМ-микрофотографии структуры слоев кремния после имплантации ионов  $BF_2^+$  (20 кэВ -  $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) (А) и совместно с ионами  $C^+$  (20 кэВ -  $4 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$ ) (Б), 30 кэВ -  $5 \times 10^{14} \text{ см}^{-2}$  (В)), а также термического отжига: 600°C, 60 мин + 1000°C, 2 мин + 850°C, 60 мин в среде  $N_2$

В случае имплантации только ионов  $BF_2^+$  в поверхностном слое кремниевой пластины регистрируются дислокационные петли с размерами

20-60 нм. Совместная имплантация углерода приводит к заметному уменьшению размеров петель до 15-20 нм. Можно отметить и снижение плотности дислокационных петель в случае имплантации углерода с энергией 30 кэВ.

### Заключение

Представленные результаты электрофизических и структурных исследований показали, что использование совместной с ионами  $BF_2^+$  имплантации ионов углерода и режима быстрого термического отжига позволяет существенно улучшить параметры формируемых мелких  $p^+n$ -переходов.

Совместная с ионами  $BF_2^+$  имплантация ионов  $C^+$  позволяет уменьшить глубину залегания формируемого при последующей термообработке  $p^+n$ -перехода на ~70 нм. Использование режима быстрого термического отжига приводит к улучшению параметров формируемых мелких  $p^+n$ -переходов в кремнии: увеличение поверхностной концентрации электрически активной примеси, увеличение степени активации легирующей примеси, снижение слоевого сопротивления.

### Список литературы

1. L.H. Zhang, K.S. Jones, P.H. Chi, D.S. Simons // Appl. Phys. Lett. - 1995. - N 67. - P. 2025.
2. P.M. Fahey, P.B. Griffin, J.D. Plummer // Rev. Mod. Phys. - 1989. - N 61. - P. 289.
3. A. Sultan, M. Craig, K. Reddy, S. Banerjee, E. Ishida, P. Maillot, L. Larson // Proc. 11-th Biennial University / Industry Microelectronics Symposium. - 1995. - P. 108.
4. S.N. Hong, G.A. Ruggies, J.J. Wortmau // IEEE Trans. Electron Devices. - 1991. - N 38. - P. 4716.
5. A. Sultan, M. Craig, K. Reddy // Appl. Phys. Lett. - 1995. - N 67. - P. 1223.
6. H. Wong, N.W. Cheung, P.K. Chu, J. Liu, J.W. Mayer // Appl. Phys. Lett. - 1988. - N 52. - P. 1023.
7. A. Cacciato, J.G.E. Klappe, N.E.B. Cowern, W. Vandervost, L.P. Biro, J.S. Custer, F.W. Saris // J. Appl. Phys. - 1996. - N 79. - P. 2314.

## CARBON CO-IMPLANTATION TO $BF_2^+$ IONS AT $P^+N$ -JUNCTIONS FORMATION IN SILICON

O. Milchanin<sup>1</sup>, F. Komarov<sup>1</sup>, V. Plebanovich<sup>2</sup>, A. Komarov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Applied Physics Problems, Kurchatov Str.7, 220064 Minsk, Belarus,

Phone +375 17 2785116; e-mail: milchanin@tut.by

<sup>2</sup> INTEGRAL Research and Production Corporation, Kazintsa sq.1, 220108 Minsk, Belarus,

Phone +375 17 2782901; e-mail: dz\_prod@integral.by

In this article carbon co-implantation and step-by-step thermal treatments of shallow  $p^+n$ -junctions formation were used with the purpose of reduction of boron transient enhanced diffusion. A substantial improvement of the electrical parameters of shallow  $p^+n$ -junctions has been achieved by using the additional carbon implantation and step-by-step thermal treatments.