

## ВЛИЯНИЕ ПОСТИМПЛАНТАЦИОННОГО ОТЖИГА НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СЛОЕВ КРЕМНИЯ, ИМПЛАНТИРОВАННОГО ФТОРОМ

Н. М. Омеляновская, Л. Я. Краснобаев, В. В. Федоров

Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов  
Российской академии наук, 142432, Черноголовка, Россия  
(Получена 10.01.1992. Принята к печати 26.06.1992)

Si *n*- и *p*-типа проводимости имплантировался ионами F<sup>+</sup> с энергией 200 кэВ при дозах (1—8) · 10<sup>13</sup> см<sup>-2</sup> и с энергией 300 кэВ при дозе 3 · 10<sup>15</sup> см<sup>-2</sup>. После имплантации образцы подвергались изохронному отжигу в атмосфере аргона при температурах в интервале 400—1100 °С. Обнаружено, что постимплантационный отжиг сопровождался изменением концентрации носителей заряда и их зарядового состояния. Дополнительные носители заряда наблюдались как в имплантированной области, так и в области, существенно превышающей глубину имплантированного слоя. В работе показано, что имплантация ионов F<sup>+</sup> в кремний обоих типов проводимости и последующая термообработка приводят к образованию электрически активных комплексов, природа и концентрация которых существенным образом зависят от дозы имплантации и температуры отжига. Форма профилей носителей заряда, совпадающая с распределением фтора, и исследовавшаяся дозовая зависимость указывают на то, что образование дополнительных носителей заряда обусловлено ионизацией комплексов, содержащих фтор. Проведенные измерения показали, что концентрация дополнительных носителей не превышает нескольких процентов от объемной концентрации фтора.

Формирование *p*<sup>+</sup>—*n*-слоев в кремнии имплантацией ионов BF<sub>2</sub><sup>+</sup> — распространенный прием технологии микроэлектроники [1—3]. Электрофизические свойства слоев, сформированных имплантацией ионов BF<sub>2</sub><sup>+</sup>, имеют некие отличия от свойств слоев, имплантированных ионами В<sup>+</sup> [2]. Причиной этих отличий может быть как свойство молекулярных ионов вызывать большие радиационные повреждения, так и наличие в имплантированных слоях, в случае имплантации ионов BF<sub>2</sub><sup>+</sup>, атомов F. В то время как влияние первого фактора общепризнано, вопрос о влиянии атомов F на электрофизические свойства Si, имплантированного ионами BF<sub>2</sub><sup>+</sup>, до сих пор остается открытым.

В работе [3] авторы не обнаружили влияния имплантации ионов F<sup>+</sup> на электрофизические свойства Si, тогда как в [4] наблюдалось образование акцепторов в *n*-Si, имплантированном ионами F<sup>+</sup>. В то же время в [5] показано, что в зависимости от местоположения атомов F в решетке монокристаллического Si F может быть как положительно, так и отрицательно заряженным.

Отсутствие единого мнения о влиянии F на электрофизические свойства имплантированного Si, а также его важность для реальной технологии микроэлектроники привели нас к необходимости провести имплантацию ионов F<sup>+</sup> в Si и исследовать распределение носителей заряда в слоях, подвергнутых постимплантационному отжигу.

Образцы Si *n*-типа проводимости, легированные фосфором, с удельным сопротивлением 4.5 Ом·см, и *p*-типа проводимости, легированные бором, с удельным сопротивлением 10 Ом·см, облучались ионами F<sup>+</sup> на установке HVEE-500 с энергией 200 кэВ (средний проективный пробег R<sub>p</sub> = 0.45 мкм), дозы облучения (1—8) · 10<sup>13</sup> см<sup>-2</sup>; при облучении Si *p*-типа, 80 Ом·см, энергия была

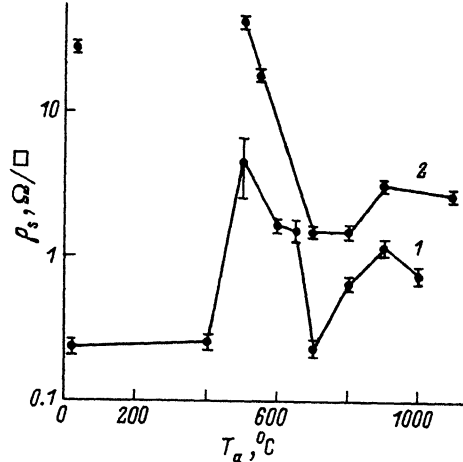


Рис. 1. Зависимость слоевого сопротивления для Si *p*-типа проводимости, имплантированного ионами F<sup>+</sup>, от температуры изохронного отжига. Энергия ионов, кэВ: 1—200, 2—300. Доза имплантации, см<sup>-2</sup>: 1—8·10<sup>13</sup>, 2—3·10<sup>15</sup>.

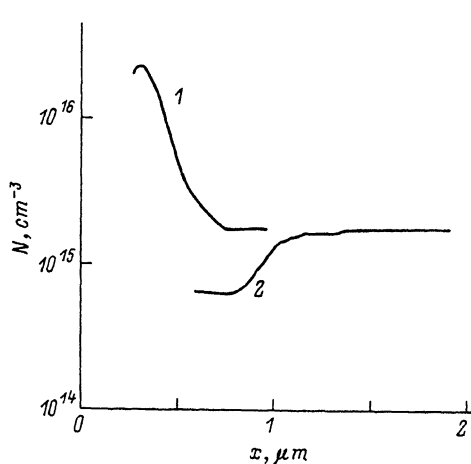


Рис. 2. Профили концентрации носителей заряда *N* в *n*-Si, облученном ионами F<sup>+</sup> и подвергнутом отжигу. Энергия ионов — 200 кэВ, доза — 4·10<sup>13</sup> см<sup>-2</sup>. T<sub>a</sub>, °C: 1—650, 2—800. Расстояние *x* отсчитывается от поверхности образца.

300 кэВ ( $R_p = 0.67$  мкм), доза —  $3 \cdot 10^{15}$  см<sup>-2</sup>. Плотность ионного тока составляла  $\sim 0.01$  мкА/см<sup>2</sup>. После имплантации образцы подвергались изохронному отжигу в течение 30 мин в атмосфере аргона при температурах в интервале 400—1100 °C. Вакуумным напылением Au на кристаллы *n*-типа и Mg на кристаллы *p*-типа проводимости формировались барьеры Шоттки. Из *C—V*-характеристик барьеров Шоттки на частоте 1 МГц определялись профили носителей заряда в имплантированной области (0—1.5 мкм от поверхности). Погрешность измерения концентрации носителей составляла  $\sim 10\%$ . На четырехзондовой установке FPP-100 «Веесо» измерялось слоевое сопротивление, на установке фирмы «Solid State Measurement» — сопротивление растекания на косом шлифе с углом 15 мин.

На рис. 1 (кривая 1) представлена типичная для кристалла Si *p*-типа проводимости, имплантированного ионами F<sup>+</sup> при дозах облучения (1—8)·10<sup>13</sup> см<sup>-2</sup>, зависимость слоевого сопротивления  $\rho_s$  от температуры отжига T<sub>a</sub>. После отжига при T<sub>a</sub> = 500—600 °C наблюдалось резкое увеличение  $\rho_s$ , что указывает на возникновение *p—n*-перехода. После отжига при T<sub>a</sub> > 600 °C наблюдалось уменьшение  $\rho_s$ , а при T<sub>a</sub> ≈ 700 °C — наличие интервала «обратного отжига».

В то же время слоевое сопротивление имплантированных ионами F<sup>+</sup> кристаллов Si *n*-типа проводимости практически не менялось в процессе постимплантационного отжига и было близким к сопротивлению подложки. Отметим, что качественная картина зависимости  $\rho_s$  от T<sub>a</sub> для Si *n*- и *p*-типа проводимости, имплантированных ионами F<sup>+</sup>, аналогична наблюдаемой при имплантации ионами Cl<sup>+</sup> [6].

Результаты *C—V*-измерений профилей носителей заряда в имплантированных F<sup>+</sup> кристаллах *n*- и *p*-типа проводимости свидетельствуют о том, что непосредственно после имплантации в приповерхностном слое кристалла увеличивается концентрация основных носителей.

Постимплантационный отжиг сопровождался изменением как концентрации дополнительных носителей заряда, так и их типа. Характерные профили носителей заряда приведены на рис. 2, а обобщенные результаты — в таблице.

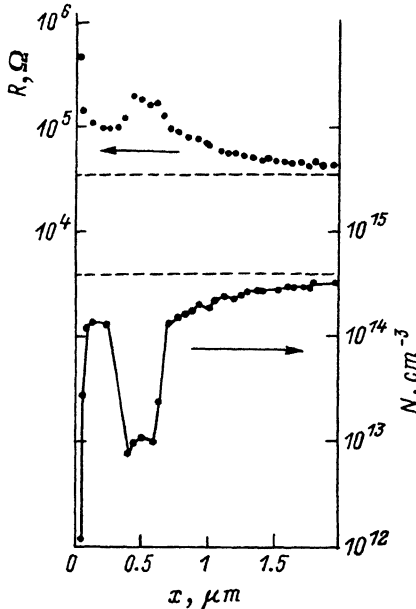


Рис. 3. Зависимость сопротивления растекания  $R$  и концентрации носителей заряда  $N$  от глубины  $x$  для кристалла  $p$ -Si, облученного ионами  $F^+$ , непосредственно после имплантации. Энергия ионов — 300 кэВ, доза —  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Штриховые линии соответствуют исходным значениям  $R$  и  $N$ .

Форма профилей дополнительных носителей заряда в большинстве случаев была подобна профилю распределения имплантированного фтора, предсказанному теорией ЛШШ [7], и близка к гауссову распределению.

При составлении таблицы мы исходили из того, что увеличение концентрации основных носителей соответствовало образованию донорных центров в  $n$ -Si и акцепторных в  $p$ -Si, а уменьшение — соответственно образованию комплексов, привносящих неосновные носители заряда.

В образцах  $p$ -типа при дозе имплантации  $(2-8) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  образование доноров  $D$  (см. таблицу) сопровождалось увеличением словесого сопротивления (см. рис. 1). После падения концентрации доноров в результате отжига при  $600-650^\circ\text{C}$  отжиг при  $800-1000^\circ\text{C}$  сопровождался вновь ее ростом. Это обстоятельство позволило нам предположить, что при отжиге в диапазоне температур  $500-700^\circ\text{C}$  в Si  $p$ -типа проводимости образуются донорные комплексы одного типа ( $D1$ ), а во время отжига при более высокой температуре — другого типа ( $D2$ ), характеризующиеся более высокой температурой образования. При меньшей дозе имплантации ( $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ ) при температурах отжига выше  $650^\circ\text{C}$  образования

доноров не наблюдалось. Напротив, наблюдалось увеличение концентрации основных носителей. Учитывая, что при данной температуре отжига в кристаллах при дозах имплантации  $1 \cdot 10^{13}$  и  $(2-8) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  разница в концентрации радиационных дефектов вследствие их эффективного отжига невелика, есть основания предположить, что различие в природе комплексов определяется количеством атомов F, в них содержащихся, т. е. комплексы  $D2$  включают большее количество атомов F, нежели акцепторные комплексы в образцах после имплантации при дозе  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ .

Имплантация ионов  $F^+$  в  $p$ -Si при более высокой дозе ( $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ ) сопровождалась образованием  $p$ - $n$ -перехода непосредственно после имплан-

Типы дефектов, возникающих при отжиге и ответственных за появление дополнительных носителей заряда

Тип Si	Доза $F^+$ $10^{13} \text{ см}^{-2}$ (200 кэВ)	Типы дефектов ( $T_a$ , $^\circ\text{C}$ )							
		(400)	(500)	(600)	(650)	(700)	(800)	(900)	(1100)
$p$	1	—	$D$	$D$	$D$	$N_0$	$A$	$A$	—
$p$	2-8	—	$D1$	$D1$	$D1$	$D1$	$D2$	$D2$	$D2$
$n$	1	$D$	$D$	$D$	$N_0$	$A$	$A$	$A$	—
$n$	2-8	$A$	$A$	$D$	$D$	$D$	$A$	$A$	—

Примечание.  $N_0$  — дополнительные носители не обнаружены.

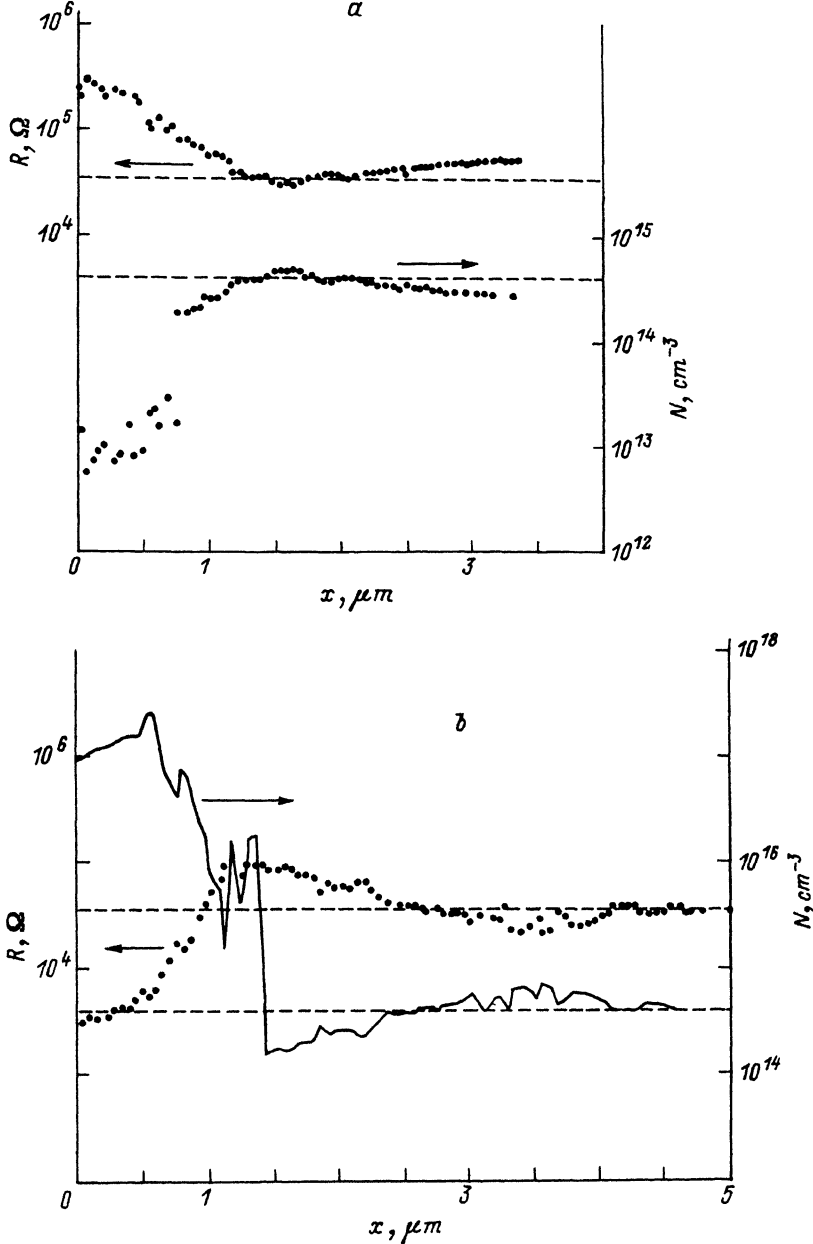


Рис. 4. Зависимости сопротивления растекания  $R$  и концентрации носителей заряда  $N$  от глубины  $x$  для кристалла  $p$ -Si, облученного ионами  $\text{F}^+$ , после отжига. Энергия ионов 300 кэВ, доза  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Температура отжига  $T_a$ ,  $^\circ\text{C}$ :  $a$  — 600,  $b$  — 700. Штриховые линии соответствуют исходным значениям  $R$  и  $N$ .

тации (см. рис. 1, 3). Дальнейший ход температурной зависимости  $\rho_s$  (рис. 1, кривая 2) аналогичен наблюдавшемуся в образцах после имплантации при дозах  $(1-8) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ .

Измерения сопротивления растекания  $R$ , проведенные на косых шлифах образцов, облученных ионами дозой  $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ , как видно из рис. 3, 4,

свидетельствовали о сложном характере распределения носителей заряда как в имплантированной области, так и в области, существенно превышающей глубину имплантированного слоя.

Непосредственно после имплантации наблюдались рост сопротивления растекания и соответственно спад концентрации основных носителей в имплантированной  $F^+$  области (см. рис. 3). Как видно из рис. 4, *a*, после отжига при  $600^\circ\text{C}$  в приповерхностной области кристалла было отмечено уменьшение количества акцепторов, тогда как на больших глубинах, 1—3 мкм, было зафиксировано их увеличение, что, по-видимому, обусловлено образованием различных центров в различных областях кристалла: донорных — в приповерхностной, акцепторных — в глубине кристалла.

В образцах же, отожженных при  $700^\circ\text{C}$  (рис. 4, *b*), наблюдалась обратная картина распределения носителей: в имплантированной области — увеличение более чем на 2 порядка концентрации основных носителей; в области 1—2.5 мкм — уменьшение их концентрации ниже уровня исходного легирования кристалла; в области 3—4 мкм — вновь увеличение концентрации акцепторов.

В образцах *n*-Si, имплантированных  $F^+$  в дозах  $(2-8) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , после отжига в диапазоне температур  $400-500^\circ\text{C}$  наблюдалось образование акцепторов (*A*), в то время как в образцах, имплантированных при дозе  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , образовывались доноры (*D*). При  $T_a = 600-700^\circ\text{C}$  в образцах, подвергнутых имплантации при дозах  $(2-8) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , было зафиксировано образование *D*, а при дозе  $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$  — изменение типа, дополнительных уровней, судя по типу дополнительных носителей, с *D* на *A*. В образцах, имплантированных  $F^+$  при дозах  $(2-8) \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ , эта смена происходила позже, при  $T_a = 800^\circ\text{C}$ , т. е. при той же температуре, при которой изменялся тип носителей в *p*-Si, когда доза имплантации была та же. Данный факт свидетельствует о сходности процессов образования комплексов в этом диапазоне температур в Si *n*- и *p*-типа проводимости.

Таким образом, в работе показано, что имплантация ионов  $F^+$  в кремний обоих типов проводимости и последующая термообработка приводят к образованию электрически активных комплексов, природа и концентрация которых существенно зависят от дозы имплантации и температуры отжига. Форма профилей носителей заряда, совпадающая с распределением фтора, и исследованная дозовая зависимость указывают на то, что образование дополнительных носителей заряда обусловлено ионизацией комплексов, содержащих фтор. Проведенные измерения показали, что концентрация дополнительных носителей не превышает нескольких процентов от дозы имплантации фтора и потому обусловлена либо частичной ионизацией центров при температуре проводившихся измерений ( $T \approx 300 \text{ K}$ ), либо ионизацией только определенной их части, являющейся электрически активной.

Полученные нами распределения носителей в областях, лежащих существенно глубже имплантированного слоя (см. рис. 4, *b*), связаны, по-видимому, с радиационно ускоренной диффузией  $F^+$  в глубь кристалла или, возможно, с проявлением присущего атомам F свойства [<sup>9</sup>] маркировать дефекты, которые, как известно [<sup>10</sup>], могут залегать много глубже имплантированного слоя.

Наблюдавшиеся с изменением температуры отжига и дозы облучения в приповерхностных слоях изменения концентрации основных носителей обусловлены, по-видимому, тем, что возникшие в результате облучения комплексы, содержащие радиационные дефекты и атомы фтора, при отжиге могут существенно перестраиваться, трансформироваться, по-разному взаимодействовать с фтором.

Авторы выражают благодарность В. Н. Мордковичу за интерес к работе и плодотворные обсуждения ее результатов, а также Д. К. Старостину и В. А. Данилову за помощь в осуществлении экспериментов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] D. G. Beanland. *Sol. St. Electron.*, **21**, 537 (1978).
- [2] M. Y. Tsai, B. G. Streetman. *J. Appl. Phys.*, **50**, 183 (1979).
- [3] R. G. Wilson. *J. Appl. Phys.*, **54**, 6879 (1983).
- [4] C. H. Chu, L. J. Chen, H. L. Hwang. *J. Cryst. Growth*, **103**, 188 (1990).
- [5] C. G. van der Walle, Y. Bar-Yam, F. R. McFelly, S. T. Panteledis. *J. Vac. Sci. Techn.*, **A6**, 1973 (1988).
- [6] Н. М. Омеляновская, Л. Я. Краснобаев. *ФТП*, **26**, 1116 (1992).
- [7] J. Lindhard, M. Scharff, H. E. Schiott. *Kgl. Danske Videnskab. Selskab. Mat.-Fys. Medd.*, **33** (1963).
- [8] M. Y. Tsai, D. S. Day, B. G. Streetman. *J. Appl. Phys.*, **50**, 188 (1979).
- [9] S. Prussin, D. I. Margoless, R. N. Tauber. *J. Appl. Phys.*, **56**, 915 (1984).
- [10] C. W. Nieh, L. J. Chen. *J. Appl. Phys.*, **62**, 4421 (1987).

Редактор Л. В. Шаронова

---