

## Влияние природы бомбардирующих ионов на образование радиационных дефектов в кремнии

© М.Ю. Барабаненков, А.В. Леонов, В.Н. Мордкович, Н.М. Омеляновская

Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов Российской академии наук, 142432 Черноголовка, Россия

(Получена 30 июня 1997 г. Принята к печати 15 сентября 1997 г.)

Методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS) изучено влияние природы имплантированных ионов на формирование электрически активных дефектов в кремнии. Имплантация ионов кислорода  $O^+$  и азота  $N^+$  дозами  $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  с энергией 75 кэВ и ионов аргона  $Ar^+$  дозой  $7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  с энергией 150 кэВ при температуре мишени 300 К обеспечивала во всех образцах *n*- и *p*-Si приблизительно одинаковое количество и пространственное распределение первичных радиационных дефектов. Обнаружено, что спектр устойчивых радиационных дефектов зависит от природы бомбардирующего иона. Так, DLTS-спектр *n*-Si, облученного ионами  $O^+$ , имеет три пика, в то время как в спектре *n*-Si, имплантированного ионами  $N^+$ , присутствует только один из них. В спектрах DLTS образцов *n*- и *p*-Si, имплантированных ионами  $O^+$  и  $N^+$ , обнаружены пики обратной полярности (аномальные), энергетическое положение которых соответствует наиболее выраженным пикам в спектрах образцов кремния противоположного типа проводимости.

### 1. Введение

Согласно современным представлениям [1], стабильные радиационные дефекты, возникающие при ионной бомбардировке кремния, являются результатом процесса, включающего образование каскадов смещенных атомов, пространственное разделение межузельных атомов и вакансий кремния, квазихимические реакции с участием междоузлий и вакансий. Тип и концентрация радиационных нарушений целиком определяются интенсивностью образования, концентрацией и подвижностью первичных точечных дефектов, а также исходной плотностью стоков в матрице для точечных дефектов. Генерация первичных дефектов задается соотношением масс иона и атома мишени, энергией, дозой и плотностью тока ионов. Диффузионная подвижность дефектов определяется температурой мишени. Индивидуальные свойства ионов как химических элементов не учитываются. Такой подход основан на том факте, что при облучении Si даже легкими ионами число рожденных междоузлий и вакансий существенно превосходит количество имплантируемой примеси [2]. Поэтому вклад специфических свойств примесных атомов, например, их химическая активность, в характер эволюции ансамбля точечных дефектов считается пренебрежимо малым. Природа примеси проявляется только лишь при значительном пересыщении ею матрицы, как, например, при ионно-лучевом синтезе слоев новых фаз в Si [3,4], когда дозы имплантации достигают величин  $10^{17} \div 10^{18} \text{ см}^{-2}$ . В то же время авторы работы [5] предположили, что именно различие химической активности водорода и гелия объясняет разное поведение радиационных дефектов в Si, имплантированном малыми дозами ионов  $H^+$  и  $He^+$ . Это предположение авторов [5] недавно подтверждено квантово-химическими расчетами [6] влияния водорода на поведение собственных точечных дефектов в Si.

В данной работе представлены экспериментально обнаруженные особенности формирования простейших комплексов радиационных дефектов в кремнии, имплантированном крайне малыми дозами ионов кислорода и азота.

### 2. Условия экспериментов

Образцы *n*-Si (КЭФ-20,  $\langle 100 \rangle$ ) и *p*-Si (КДБ-20,  $\langle 100 \rangle$ ), содержащие кислород в концентрации  $\sim 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и азот в концентрации  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ , облучали ионами  $O^+$  и  $N^+$  с энергией 75 кэВ в одинаковых дозах  $2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$  при плотности ионного тока  $1.25 \text{ нА/см}^2$ , а также ионами  $Ar^+$  с энергией 150 кэВ дозой  $7 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-2}$  при плотности тока  $0.5 \text{ нА/см}^2$ , температура мишени была 300 К. Дозы и энергии имплантации определены из условия создания ионами приблизительно равного количества и пространственного распределения первично смещенных атомов Si. Действительно, согласно расчетам по программе TRIM [2], общее число смещений, создаваемых ионами  $O^+$  или  $N^+$ , равно  $7 \cdot 10^{13}$ , ионами  $Ar^+$  —  $9 \cdot 10^{13}$  при линейных плотностях смещений  $2 \cdot 10^7$  и  $8 \cdot 10^7 \text{ ион}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  соответственно. Концентрация кислорода и азота в максимумах распределения пробегов ионов составляла  $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Дозы ионов были выбраны столь малыми, чтобы избежать влияния процессов образования частиц новых химических фаз  $SiO_2$  и  $Si_3N_4$  [3,4] на спектр радиационных дефектов. Поэтому в отсутствие влияния природы ионов возможно ожидать одинаковых свойств облученных слоев.

Параметры глубоких уровней, создаваемых радиационными дефектами, определялись методом нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS). Для проведения измерений на лицевой стороне облученных образцов методом термического распыления в вакууме (Au на *n*-Si и Al на *p*-Si) формировали барьеры Шоттки, а на тыльной — омические контакты. Спектры

**Таблица 1.** Глубина залегания уровней радиационных дефектов и их идентификация по литературе [7–9]

Пик	Энергия		Вид дефекта
$E_1$	$E_c - 0.18$ эВ		A-центр (O + V)
$E_2$	$E_c - 0.46$ эВ		Дивакансия $V_2$
$E_3$	$E_c - 0.5$ эВ		Мультивакансионный комплекс
$E_4$	$E_c - 0.23$ эВ		Дивакансия $V_2$
$H_1$		$E_v + 0.1$ эВ	Не идентифицирован
$H_2$		$E_v + 0.28$ эВ	K-центр (V–O–C)
$H_3$		$E_v + 0.38$ эВ	Не идентифицирован

**Таблица 2.** Отношение концентрации электрически активных центров к концентрации основных носителей заряда в кремнии. В правом столбце приведены суммарные значения

<i>n</i> -Si					
Ион	$E_1$	$E_2$	$E_3$	$E_4$	$\Sigma E_i$
O <sup>+</sup>	0.001	0.062	0.010		0.072
N <sup>+</sup>		0.102			0.102
Ar <sup>+</sup>	0.007	0.075	0.010	0.001	0.092
<i>p</i> -Si					
Ион	$H_1$	$H_2$	$H_3$	$\Sigma H_i$	
O <sup>+</sup>	0.002	0.057	0.015	0.074	
Ar <sup>+</sup>	0.001	0.100	0.035	0.136	

DLTS измеряли при постоянном обратном смещении, равном  $\mp 1$  В, амплитуде импульса заполнения  $\pm 1$  и  $\pm 0.85$  В для *n*- и *p*-Si соответственно. При использованных уровнях легирования и смещения ширина области пространственного заряда составляла приблизительно 3 мкм, что с учетом энергии имплантируемых ионов обеспечивало полное перекрытие дефектной области. Две амплитуды заполняющего импульса (1 и 0.85 В) позволили характеризовать пространственное положение дефектов. Идентификация наблюдаемых электрически активных центров в спектрах Si проведена по литературе [7–9] и сведена в табл. 1. В табл. 2 представлены относительные концентрации глубоких уровней, величина которых в единицах концентрации основных носителей заряда в Si превышает значение  $10^{-3}$ .

### 3. Результаты и обсуждение

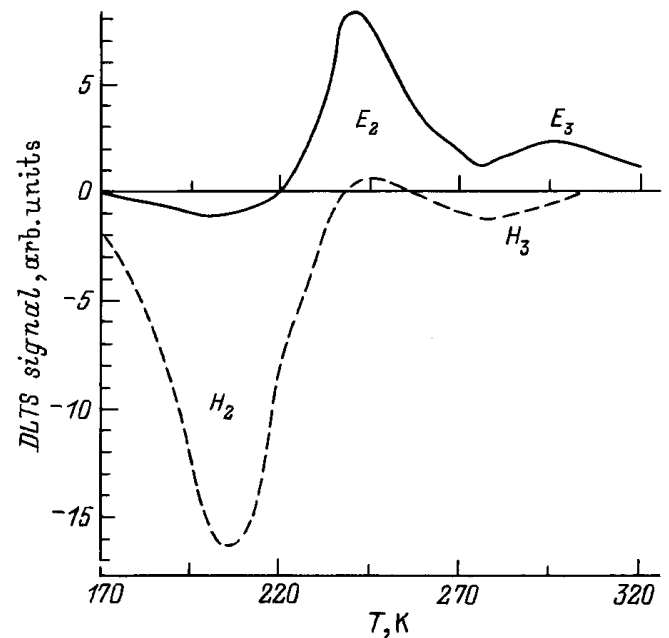
Как видно из рисунка и табл. 2, спектр DLTS, соответствующий *n*-Si (O<sup>+</sup>), содержит три пика.<sup>1</sup> В то же время в спектре *n*-Si (N<sup>+</sup>) наблюдается единственный пик, соответствующий глубокому уровню  $E_2$ . Однако

<sup>1</sup> Далее по тексту будет использоваться обозначение типа *k*-Si (M<sup>+</sup>), говорящее о том, что рассматривается электронный ( $k = n$ ) или дырочный ( $k = p$ ) кремний, облученный ионами M.

концентрация электрически активных центров, вносимых ионами N<sup>+</sup>, выше суммарной концентрации дефектов, порождаемых ионами O<sup>+</sup>. Спектр *n*-Si (Ar<sup>+</sup>) имеет три пика, как и в случае *n*-Si (O<sup>+</sup>), и еще один дополнительный пик  $E_4$  (см. табл. 2). Заметим, что метод DLTS позволяет следить только за электрически активными дефектами, которые являются частью полного количества радиационных дефектов кремния. Возможно, этим и объясняется наблюдаемое в эксперименте большее суммарное количество радиационных дефектов при облучении *n*-Si азотом по сравнению с кислородом (см. правую колонку табл. 2).

В нижней части табл. 2 приведены концентрации глубоких уровней в *p*-Si. Согласно этим данным принципиального отличия в спектрах DLTS образцов, имплантированных ионами O<sup>+</sup> и Ar<sup>+</sup>, отмечено не было: в обоих случаях наблюдались одни и те же типы радиационных дефектов.

В спектрах DLTS образцов обоих типов проводимости, облученных ионами O<sup>+</sup> или N<sup>+</sup>, наблюдались пики обратной полярности (аномальные), несмотря на то что инжекция носителей из барьера Шоттки была исключена, так как в измерениях амплитуда заполняющего импульса не превышала величины обратного смещения. Обычно амплитуда аномальных пиков была невелика. Исключение составлял спектр *p*-Si (N<sup>+</sup>), в котором аномальные пики имели значительную величину и, накладываясь на нормальные пики, не позволили интерпретировать спектр этого образца.



Спектры DLTS образцов *n*-Si (сплошная линия) и *p*-Si (штриховая), имплантированных ионами кислорода с дозой  $2 \cdot 10^{11}$  см<sup>-2</sup> и энергией 75 кэВ при температуре 300 К. Пики на сплошной и штриховой линиях, соответствующие одной и той же температуре, обозначены одним символом:  $H_2$  или  $E_2$ .

О появлении аномальных пиков в спектрах DLTS кремния с барьерами Шоттки, облученного протонами и ионами бора, сообщалось в работах [10,11]. В отличие от результатов этих работ в наших экспериментах определено, что энергетическое положение аномальных пиков приблизительно соответствует энергиям наиболее выраженных максимумов в спектрах для кремния с противоположным типом проводимости. Действительно, максимум аномального пика в спектре  $p$ -Si (пик  $E_2$  на штриховой кривой рисунка) и максимум наибольшего по величине пика в спектре  $n$ -Si (пик  $E_2$  на сплошной кривой рисунка) соответствуют приблизительно одной и той же температуре измерений. Таким же образом связаны пики  $H_2$  на штриховой и сплошной кривых на рисунке. Заметим, что в спектрах, полученных при сканировании заглубленного слоя кремния, т. е. при приложении обратного смещения  $-1$  В и амплитуде импульса заполнения не выше  $+0.85$  В, пики  $E_2$  и  $H_2$  отсутствовали. Это означает, что дефекты, ассоциированные с указанными пиками, находятся вблизи поверхности кристалла.

Появление аномальных пиков в спектрах DLTS имплантированных образцов Si также связано с природой внедренных ионов. Действительно, аномальные пики не были отмечены при имплантации ионов  $Ar^+$ , но наблюдались в Si, облученном ионами  $O^+$  и  $N^+$ .

Как уже было отмечено, спектры DLTS образцов  $n$ -Si( $O^+$ ) и  $n$ -Si( $N^+$ ) (см. табл. 2) существенно различаются между собой. В спектре  $n$ -Si( $N^+$ ) не обнаружено ни характерного для А-центров пика  $E_1$ , ни пика  $E_3$ , соответствующего мультивакансионным комплексам. В то же время дивакансионный пик  $E_2$  достигает максимальной для всех образцов величины. Отсутствие А-центров в  $n$ -Si( $N^+$ ) позволяет сделать вывод о том, что квазихимические реакции с участием вакансий протекают внутри каскада смещенных атомов. В противном случае, т. е. при значительном разбегании вакансий из каскада смещений и протекании реакций в окружающей матрице, должно наблюдаться примерно одинаковое количество А-центров как в  $n$ -Si( $O^+$ ), так и в  $n$ -Si( $N^+$ ). Существенной деталью здесь является то, что концентрация кислорода в образцах  $n$ -Si( $O^+$ ) и  $n$ -Si( $N^+$ ) практически одинакова, так как имплантация ионов  $O^+$  приводит к пренебрежимо малому изменению объемной концентрации кислорода в кремнии. Действительно, как ранее было отмечено, в исходных образцах кислорода содержится  $\sim 7 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , а в максимуме распределения пробегов ионов концентрация кислорода имеет величину порядка  $10^{16} \text{ см}^{-3}$ .

Таким образом, при несущественном различии в концентрации примесей между образцами  $n$ -Si, имплантированными кислородом и азотом, наблюдается (см. табл. 2) значительное различие в концентрации А-центров минимум на порядок величины (точность метода DLTS составляла  $10^{-4}$  в относительных единицах, принятых в табл. 2).

## 4. Заключение

Эксперименты, рассмотренные в данной работе, поставлены таким образом, чтобы в образцах кремния при имплантации разных ионов были по возможности одинаковые характеристики первичных радиационных дефектов. В этих условиях обнаружено влияние природы иона на формирование вторичных радиационных дефектов: 1) спектры дефектов в  $n$ -Si, имплантированном ионами кислорода и азота, отличаются качественным образом; 2) аномальные пики обнаружены в спектрах DLTS образцов  $n$ - и  $p$ -Si, имплантированных ионами кислорода и азота, и не обнаружены после облучения ионами аргона. Также выявлена корреляция в энергетическом положении нормальных и аномальных пиков и спектрах DLTS кремния разного типа проводимости, причем дефекты, отсутствующие за появление этих пиков, находится в приповерхностной области кристаллов. Особо необходимо отметить следующую взаимосвязь: ионы азота приводят к доминирующему образованию дивакансий в  $n$ -Si и к появлению больших по величине аномальных пиков в спектре DLTS образцов  $p$ -Si.

Авторы благодарят О.В. Феклисову и Н.А. Ярыкина за помощь в проведении измерений спектров DLTS.

## Список литературы

- [1] J. Gulai. *Handbook of Ion Implantation*, ed. by I.F. Ziegler (Elsevier, Amsterdam, 1992).
- [2] J.R. Biersack, L.G. Hagmark. *Nucl. Instr. Meth.*, **174**, 257 (1980).
- [3] P.L.F. Hemment, E. Maydell-Ondrusz, K.S. Stevens. *Vacuum*, **34**, 203 (1984).
- [4] T. Tsujide, M. Nojiri, H. Kitagava. *J. Appl. Phys.*, **51**, 1605 (1980).
- [5] А.И. Алешин, Л.С. Смирнов, В.Ф. Стась. *ФТП*, **17**, 551 (1983).
- [6] В.М. Пинчук, А.Н. Назаров, В.С. Лысенко, Т.В. Янчук. *ФТП*, **30**, 2133 (1996).
- [7] В.С. Вавилов, В.Ф. Кисилев, Б.Н. Мукашев. *Дефекты в кремнии и на его поверхности* (М., Наука, 1990).
- [8] L.G. Kimerling, J.L. Benton. *Physica B*, **116**, 297 (1983).
- [9] M.O. Aboelfotoh, B.G. Svensson. *Phys. Rev. B*, **52**, 2522 (1995).
- [10] M.A. Tranwaert, J. Vanhellefont, E. Simoen, C. Claeys, B. Johlander, L. Adams, P. Clauws. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **39**, 1747 (1992).
- [11] И.В. Антонова, С.С. Шаймеев. *ФТП*, **29**, 605 (1995).

Редактор Л.В. Шаронова

## The influence of bombarded ions on the radiation defect formation in silicon

M.Yu. Barabanenkov, A.V. Leonov, V.N. Mordkovich,  
N.M. Omelyanovskaya,

Institute of Microelectronics Technology  
and High Purity Materials,  
142432 Chernogolovka, Russia

**Abstract** The dependence of radiation defects in silicon on implanted ions is studied by the deep level transient spectroscopy (DLTS) method. Roughly equal amounts with practically coinciding spatial profiles of the primary radiation defects were introduced in *n*- and *p*-Si samples by implantation of oxygen or nitrogen ions with the doses of  $2 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  and energies 75 keV as well as of argon ions with the dose of  $7 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$  and the energy 150 keV at a substrate temperature of 300 K. Three irradiation induced levels were observed in the DLTS spectra of *n*-Si implanted with  $\text{O}^+$  ions and only one of them was found in the case of  $\text{N}^+$  irradiation. Inverse peaks are observed in the DLTS spectra of Si samples irradiated with  $\text{O}^+$  or  $\text{N}^+$  ions. Temperatures of the inverse and normal peaks correlated in the samples with different types of conductivity.