

ДИФФУЗИИ ВНЕДРЕННЫХ ИОНОВ ЛИТИЯ В КРЕМНИИ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОТОНОВ И ДЕЙТОНОВ

Л. Н. Кацауров, В. В. Краснопевцев, К. Нургалиев

УДК 621.315.592

С помощью резонансной реакции захвата протонов ${}^7\text{Li}(p, \gamma){}^8\text{Be}^*$ по изменению распределения имплантированных ионов Li по глубине в Si и $\text{SiO}_2\text{-Si}$ под действием бомбардировки протонами и дейтонами определены коэффициенты диффузии Li .

Эффективным способом воздействия на реакции в твердой фазе при низких температурах является облучение полупроводников ионизирующими излучениями (электроны, протоны, лазерное излучение и т.п.). Так, диффузные процессы в твердом теле можно, в частности, ускорить путем дополнительного облучения кристалла частицами /1,2/.

В настоящем сообщении приводятся данные о диффузии Li в Si и системе $\text{SiO}_2\text{-Si}$ после ионной имплантации под действием облучения быстрыми протонами и дейтонами при низких температурах. В сильно разупорядоченном кремнии заметная диффузия Li происходит при повышенных температурах, а механизм миграции имплантированных атомов Li , особенно при высоких концентрациях, остается неясным /3/.

В работе использовался Si n- или p-типов (см. табл. I). Образцы предварительно легировались путем ионного внедрения при комнатной температуре. Облучение протонами и дейтонами проводилось на электростатическом ускорителе ЭГ-2 ИЯИ АН СССР. Температура образцов во время облучения не превышала 100°C /4/.

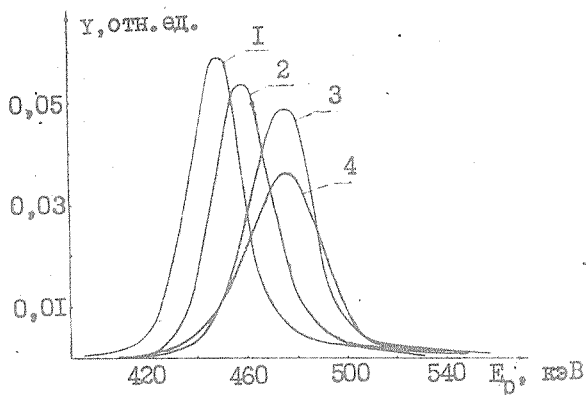
Распределение внедренного Li по глубине исследовалось методом (p, γ) - резонанса, в котором относительный выход $\gamma = N_\gamma / N_p$

Таблица I

Условия эксперимента и результаты

№ п/п	Характеристика образцов и условия внедрения Li	Условия облучения протонами (дейтонами)				Эффективный коэффициент диффузии $10^{-15} \text{ см}^2/\text{с}$	
		Тип частицы	Энергия, кэВ	Плотность тока, $\mu\text{кА}/\text{см}^2$	Плотность мощности в мишени, $\text{Вт}/\text{см}^2$		Доза частиц, 10^{17} см^{-2}
I	n-Si (100-250 Ом·см) $E_{Li} = 40 \text{ кэВ}$ $\Phi_{Li} = 0,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$	p	360	5,0 4,8 7,2	1,8 1,7 2,6	7,5 30 48	0,3 0,2 0,7
2		p	425	8,3	3,5		1,0
3	p-Si (7,5 Ом·см)	p	460	4,6	2,1	7,5	1,1
4	$E_{Li} = 70 \text{ кэВ}$	p	490	11,7	5,7		1,6
5	$\Phi_{Li} = 10^{16} \text{ см}^{-2}$	d	360	3,9	1,4	7,5	0,1
6		d	460	4,9	2,2		0,5
7	p-Si (3,9 Ом·см) $E_{Li} = 150 \text{ кэВ}$ $\Phi_{Li} = 10^{16} \text{ см}^{-2}$	p	400	3,5	1,4	7,5	1,2
8	n-SiO ₂ /Si (100-250 Ом·см) $E_{Li} = 70 \text{ кэВ}$ $\Phi_{Li} = 10^{16} \text{ см}^{-2}$	p	460	4,1	1,9	7,5	0,2

измерялся в зависимости от энергии E_p падающих протонов (N_p - количество протонов, падающих на мишень; N_γ - число γ -квантов, зарегистрированных счетчиком, см. рис. 1). Профиль распределения концентрации Li в Si и SiO₂-Si рассчитывался по кривым относительного выхода $\gamma(E_p)/3,5\%$. Измерения проводились до и после облучения протонами и дейтонами различной энергии.

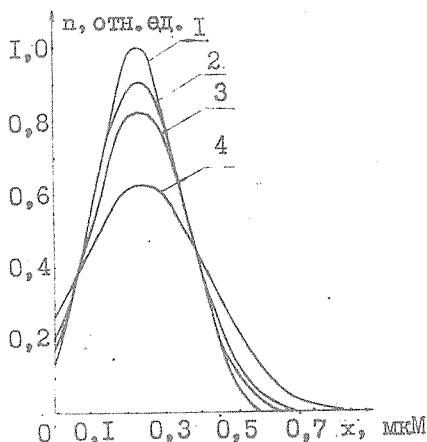


Р и с. 1. Кривые выхода $\gamma(E_p)$ реакции ${}^7\text{Li}(p, \gamma){}^8\text{Be}^*$ в Si, имплантированном ионами Li с $E_{\text{Li}} = 40$ кэВ при дозе $\Phi_{\text{Li}} = 0,7 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ до облучения (1) и после облучения с $E_p = 360$ кэВ при дозах: $7,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (2); $3,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (3); $4,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (4)

Профили распределения Li в Si лучше всего описываются гауссовой кривой. За счет диффузии при облучении протонами или дейтонами кривая распределения ионов Li расширяется, причем гауссова форма кривой сохраняется (см. рис. 1 и 2). В этом случае эффективный коэффициент диффузии D можно найти из соотношения /6/:

$$D = \frac{\Delta^2 - \Delta_0^2}{4t}, \quad (1)$$

где Δ - полуширина кривой распределения после облучения, см;
 Δ_0 - полуширина кривой распределения до облучения, см; t - время облучения, с.



Р и с. 2. Расчетные профили распределения внедренных ионов Li с $E_{Li} = 40$ кэВ в Si до облучения (1) и после облучения протонами с $E_p = 360$ кэВ при дозах $7,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (2); 3 - $3,0 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (3); $4,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ (4).

На рис. 2 представлены профили распределения внедренных ионов Li с энергией 40 кэВ в кремнии до и после облучения протонами с энергией 360 кэВ, рассчитанные из кривых относительного выхода $\chi(E_p)$ рис. 1. Сдвиг кривых на рис. 1, вероятно, обусловлен полимеризацией органической пленки на поверхности мишени в процессе облучения и, как следствие, дополнительными потерями энергии протонами при прохождении через эту пленку.

В табл. I приведены основные параметры, характеризующие условия внедрения ионов Li и бомбардировки протонами и дейтонами, а также значения эффективного коэффициента диффузии D . В целом экспериментальные результаты сводятся к следующему:

1. Расширение профиля распределения Li становится заметным при достаточно высоких дозах протонов и дейтонов ($\Phi \gg 7,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$). Величина D растет с плотностью тока пучка протонов и дейтонов.

2. При прочих равных условиях эффективный коэффициент диффузии при облучении протонами выше, чем для дейтонов.

3. Радиационно-стимулированная миграция Li происходит значительно быстрее в Si, чем в SiO₂-Si.

Известно, что бомбардировка аморфизированного слоя Si тяжелыми ионами в случае достаточно высоких доз и плотностей тока ионного пучка приводит к рекристаллизации. Вместе с тем, при протонной бомбардировке нарушенных слоев в Si отжиг дефектов разупорядоченного слоя ускоряется независимо от того, проводится ли она одновременно с термическим отжигом или ему предшествует. В настоящее время механизм радиационно-стимулированного отжига нарушений остается не вполне ясным. Во всяком случае, известно, что скорость рекристаллизации Si возрастает (толщина аморфизированного слоя уменьшается) с увеличением плотности тока пучка при облучении /7/. Эти данные не противоречат тому факту, что с увеличением плотности тока протонного и дейтонного пучков растет эффективный коэффициент диффузии в кремнии.

Различие в коэффициентах диффузии лития D при облучении протонами и дейтонами связано, по-видимому, с тем, что под действием дейтонов образуется больше радиационных дефектов, чем при облучении протонами. Взаимодействие ионов Li с этими дефектами способствует замедлению их миграции, что и объясняет меньшее значение коэффициента диффузии при облучении дейтонами. Необходимо отметить, что при бомбардировке дейтонами с энергией 460 кэВ кроме самих дейтонов в слое Si в результате (d, d)-реакции образуются нейтроны с энергией 2,5 МэВ. Однако из-за очень малого сечения этой реакции количество нейтронов будет на 8-9 порядков меньше количества дейтонов, так что вкладом нейтронов в радиационно-управляемую диффузию можно пренебречь.

Низкий коэффициент диффузии Li, наблюдаемый в структуре SiO₂-Si, обусловлен, вероятно, образованием комплексов лития с кислородом после ионного внедрения /8/.

В заключение авторы благодарят Л. Е. Кузьмина и А. В. Степанова за полезное обсуждение экспериментальных результатов, К. Б. Кадыракунова и В. В. Тишина за помощь в проведении экспериментов на ЭГ-2 ИЯИ АН СССР.

Поступила в редакцию
23 марта 1981 г.

Институт ядерных исследований АН СССР

Л и т е р а т у р а

1. P. Baruch et al., Discuss. Faraday Soc., 31, 86 (1961).
2. C. Meyer, I. W. Meyer, J. Appl. Phys., 41, 4166 (1970).
3. Е. М. Баядилов и др., Краткие сообщения по физике ФИАН № 5, 36 (1978).
4. S. Furukawa, O. Inoue, H. Ishiwara, Japan. J. Appl. Phys., 12, 1075 (1973).
5. Е. М. Баядилов, К. Нургалиев, в сб. Прикладная ядерная физика и космические лучи, Казахский гос. ун-т, Алма-Ата, 1979 г., с. 82.
6. К. Зеегер, Физика полупроводников, "Наука", М., 1977 г., с. 162.
7. В. И. Вихрев и др., в сб. Дефекты структуры в полупроводниках, Новосибирск, 1973 г., с. 215.
8. А. С. Антонов, Л. Г. Кукеселиева, Дрейф лития в электрическом поле р-n-типа перехода в кремнии и германии, София, 1972 г., с. 15.