

06.1;06.2;12

©1994

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОЗАКОЛОЧНЫХ ДЕФЕКТОВ НА КИНЕТИКУ ГЕНЕРАЦИИ ТЕРМОДОНОРОВ В КРЕМНИЙ 450°С

*М.К.Багадырханов, Ш.И.Аскаров,  
Н.Наркулов, С.Н.Сражеев, Т.У.Тошбоев*

Известно, что в процессе термообработки кристаллов кремния, выращенных по методу Чохральского, в зависимости от температуры отжига и условий закалки образуются три типа термодфектов. Первый тип термодфектов возникает в процессе термообработки кристаллов в интервале температур 350 – 550°С [1,2]. Учитывая, что при вышеописанных условиях отжига в объеме кристаллов возникают дефекты исключительно донорной природы, их условно называют термодонорами 1-го типа (ТД-1). Второй тип термодфектов возникает в процессе термообработки кристаллов в интервале температур 600–800°С [3–5]. По природе эти термодфекты также являются донорами. Поэтому их относят к термодонорам 2-го типа (ТД-2). Третий тип термодфектов возникает в случае закалки кристаллов после высокотемпературной обработки в интервале температур 800–1400°С. Учитывая, что как концентрация, так и спектры энергетических уровней таких дефектов зависят не только от температуры отжига, но и скорости закалки, их относят к термозаклочным дефектам (ТЗД) [6–12].

В настоящее время установлено, что предварительное насыщение кристаллов кремния ТД-1 способствует усилению генерации ТД-2 [5]. Здесь возникает естественный вопрос — влияет ли ТЗД на генерацию термодфектов как 1-го, так и 2-го типа.

Исходя из этого настоящее исследование посвящено изучению влияния ТЗД на кинетику генерации термодоноров 1-го типа в зависимости от концентрации ТЗД. Генерация ТЗД в объеме кремния осуществлялась путем термообработки кристаллов в интервале температур 1000–1250°С с последующей закалкой со скоростью 500 град/с.

В качестве исходного материала использовались образцы монокристаллического кремния, выращенного по методу Чохральского, диаметром 60 мм марки КЛБ с концентрацией бора  $N = 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ , исходной концентрацией кислорода  $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  и содержанием углерода  $3.5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ . Перед

отжигом после механических и химических обработок осуществлялась финишная очистка кристаллов на перекисно-аммиачном растворе. Отжиг кристаллов осуществлялся в откачанных до  $10^{-5}$  мм рт. ст. кварцевых ампулах, предварительно очищенных царской водкой ( $\text{HNJ}_3 + 3\text{HCL}$ ). Параметры после термообработок приведены в табл. 1. Из результатов, приведенных в табл. 1, следует, что в процессе термоотжига в объеме кристалла кремния генерируется ТЗД, в результате удельное сопротивление кристаллов кремния начинает возрастать. При этом изменение удельного сопротивления кристаллов немонотонно зависит от температуры отжига. С ростом температуры отжига в интервале  $1000 - 1150^\circ\text{C}$  кристаллов повышается вплоть до собственной проводимости с последующей инверсией типа их проводимости на  $n$ -тип при  $T = 1150^\circ\text{C}$ . Дальнейший рост температуры сопровождается снижением  $\rho$  кристаллов, что свидетельствует о немонотонном изменении концентрации ТЗД от температуры отжига. Проведенные расчеты на основе решения уравнения электронейтральности с учетом спектра энергетических уровней ТЗД ( $E_v + 0.40$ ,  $E_c - 0.35$  эВ [6-8]) и параметров кристаллов показали, что по мере роста температуры отжига в интервале  $1000 - 1150^\circ\text{C}$  концентрация ТЗД возрастает в пределах  $(7 \cdot 10^{13} - 1.0 \cdot 10^{15}) \text{ см}^{-3}$  и впоследствии снижается до концентрации  $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$  при температуре отжига  $1250^\circ\text{C}$ . Перед тем как исследовать влияние ТЗД на кинетику генерации ТД-1, все кристаллы подвергались отжигу при  $300^\circ\text{C}$  в течение 1 ч. Потребность в таком отжиге продиктована тем, что разброс параметров кристаллов, отожженных при различных температурах, в дальнейшем может осложнить оценку скорости генерации ТД-1. Такая термообработка, в целом не влияя на концентрацию ТЗД, переводит их в электрически неактивное состояние. Действительно, как показали результаты исследований, которые приведены также в табл. 1, независимо от температуры предварительной высокотемпературной обработки, в процессе термообработки при  $300^\circ\text{C}$  практически все ТЗД распадаются и кристалл приобретает параметры исходного материала.

Затем все кристаллы после отжига при  $300^\circ\text{C}$  подверглись термоотжигу при  $450^\circ\text{C}$  различной длительности. В процессе термоотжига при  $450^\circ\text{C}$  в объеме кристаллов имеет место генерация ТД-1, вследствие чего по мере увеличения длительности отжига  $\rho$  материала повышается с последующей инверсией типа проводимости на  $n$ -тип и снижением  $\rho$  (табл. 2). При этом наиболее резкое изменение параметров имеет место в кристаллах, предварительно отожженных при  $T = 1150^\circ\text{C}$ , то есть при той температуре, при которой в объеме кремния генерируется максимальная концен-

трация ТЗД. Такая корреляция между концентрацией ТЗД с генерацией ТД-1 свидетельствует о наличии взаимосвязи между ТЗД и ТД-1.

Обычно в процессе высокотемпературной обработки в объеме кремния генерируется два типа ТЗД — точечного [6-8] и неточечного [9-12]. Генерацию дефектов точечного типа связывают с активацией в объеме кремния неконтролируемых БДП или диффузией их в объеме из загрязненной поверхности. Изменение электрических параметров кристаллов в процессе высокотемпературной обработки в основном определяется генерацией ТЗД точечного типа. Концентрация ТЗД, как показывают результаты работ [12] и наши результаты, немонотонно зависят от температуры отжига, достигая своего максимального значения ( $\sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ) при  $T = 1150^\circ\text{C}$ . Снижение концентрации ТЗД точечного типа при  $T > 1150^\circ\text{C}$  связывают с объединением дефектов точечного типа и возникновением ассоциатов, то есть образованием дефектов неточечного типа. Дефекты неточечного типа с размерами  $100 \text{ \AA}$  преимущественно генерируются в объеме кремния в интервале температур  $1100 - 1400^\circ\text{C}$ , и концентрация их монотонно увеличивается по мере увеличения температуры отжига до своего максимального значения  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ .

Установленная корреляция между концентрацией ТЗД и скоростью генерации ТД-1 свидетельствует в пользу того, что на кинетику генерации ТД-1 в основном оказывают влияние дефекты точечного типа, т. е. центры внедрения быстродиффундирующих примесей (БДП). Если в процессе термообработки при  $300^\circ\text{C}$  БДП, мигрируя к центрам распада, переходят в электрически неактивное состояние и удерживаются там в силу механических напряжений, то термоотжиг при  $450^\circ\text{C}$  стимулирует их переход вновь в состояние внедрения и участие их в процессе комплексообразования, сопровождаемый генерацией ТД-1.

В литературе генерацию ТД-1 связывают с небольшими кислородными комплексами, в состав которых, возможно, входят междоузельные атомы кремния. Однако с учетом результатов влияния ТЗД на скорость генерации ТД-1 можно отметить, что в состав небольших кислородосодержащих комплексов входят также междоузельные атомы БДП, хотя в данном этапе исследований невозможно конкретно предсказать, какие именно из БДП оказывают влияние на процесс генерации ТД-1. Для этого необходимо исследовать процесс генерации ТД-1 в условиях насыщения кремния конкретными БДП. Эти вопросы будут рассмотрены нами в следующих публикациях.

Таблица 1.

	Температура отжига, °С											
	1000		1100		1150		1200		1250			
	ТП	$\rho$ , Ом · см	ТП	$\rho$ , Ом · см	ТП	$\rho$ , Ом · см	ТП	$\rho$ , Ом · см	ТП	$\rho$ , Ом · см		
После термо-отжига	<i>p</i>	10.9	<i>p</i>	11.2	<i>n</i>	$5.7 \cdot 10^4$	<i>p</i>	$4.7 \cdot 10^4$	<i>p</i>	14.3		
После ТО при 300°С 1 ч	<i>p</i>	10.79	<i>p</i>	10.15	<i>p</i>	10.43	<i>p</i>	10.97	<i>p</i>	10.90		

Примечание: ТП-тип проводимости,  $\rho$  — удельное сопротивление материала.

Таблица 2.

<i>t</i> , ч	Температура предварительного отжига, °С														
	1000			1100			1150			1200			1250		
	ТП	$\rho$ , Ом · см	ТП	$\rho$ , Ом · см	ТП	$\rho$ , Ом · см	ТП	$\rho$ , Ом · см	ТП	$\rho$ , Ом · см	ТП	$\rho$ , Ом · см	ТП	$\rho$ , Ом · см	
0.5	<i>p</i>	12.1	<i>p</i>	20.7	<i>p</i>	54.2	<i>p</i>	27.5	<i>p</i>	20.1	<i>p</i>	20.1	<i>p</i>	20.1	
1.0	<i>p</i>	28.5	<i>p</i>	77.9	<i>n</i>	22.4	<i>p</i>	113.0	<i>p</i>	84.5	<i>p</i>	84.5	<i>p</i>	84.5	
1.5	<i>p</i>	67.1	<i>n</i>	15.4	<i>n</i>	7.7	<i>n</i>	30.0	<i>n</i>	47.1	<i>n</i>	47.1	<i>n</i>	47.1	
2.0	<i>n</i>	20.4	<i>n</i>	8.75	<i>n</i>	4.3	<i>n</i>	9.4	<i>n</i>	11.5	<i>n</i>	11.5	<i>n</i>	11.5	
2.5	<i>n</i>	12.1	<i>n</i>	5.7	<i>n</i>	2.6	<i>n</i>	4.8	<i>n</i>	6.0	<i>n</i>	6.0	<i>n</i>	6.0	
3.0	<i>n</i>	7.4	<i>n</i>	3.8	<i>n</i>	2.3	<i>n</i>	3.5	<i>n</i>	3.9	<i>n</i>	3.9	<i>n</i>	3.9	

## Список литературы

- [1] Fuller C.S., Ditzenberger I.A., Hannay N.V., Buehler F. // Phys. Rev. 1954. V. 96. N 3. P. 833.
- [2] Kaiser W., Frisch H.L., Deiss H. // Phys. Rev. 1958. V. 112. N 5. P. 1546-1554.
- [3] Babich V.M., Baran N.P., Bugai A.A., Konchits A.A., Kovalchuk V.B., Maksimenko V.M., Shanina B.D. // Phys. Stat. Solid. (a). 1988. V. 109. N 2. P. 537-547.
- [4] Bekman H.H., P. Th., Gregorkiwiech T., Van Vezer D.A., Amterlaan C.A. // J. Appl. Phys. 1987. V. 62. N 11. P. 4404-4405.
- [5] Гринштейн П.М., Лазарев Г.В., Орлова Е.В., Сальник З.А., Фистуль В.А. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 1. С. 121-123.
- [6] Swanson M.L. // Phys. Stat. Solid. 1969. V. 33. N 2. P. 721-730.
- [7] Bemsici C., Dias C.A. // J. Appl. Phys. 1964. V 35. N 10. P. 2983-2985.
- [8] Elstner L., Kamprath W. // Phys. St. Sol. 1967. V. 22. N 2. P. 542-547.
- [9] Конорова Л.Ф. // ФТТ. 1972. Т. 14. В. 6. С. 1852-1854.
- [10] Конорова Л.Ф. // ФТТ. 1974. Т. 16. В. 2. С. 547-549.
- [11] Leskoschak W., Feichtinger H., Mrkor K. // Acta Phys. Austriaca. 1975. V. 41. N 1. P. 89-101.
- [12] Болтакс Б.И., Конорова Л.Ф. В сб.: Глубокие уровни в полупроводниках. Ташкент, 1981. С. 69-87.

Ташкентский государственный  
технический университет  
Узбекистан

Поступило в Редакцию  
9 августа 1994 г.