

ОСОБЕННОСТИ ОТЖИГА КОМПЕНСИРУЮЩИХ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В БЕЗДИСЛОКАЦИОННОМ *n*-КРЕМНИИ

Казакевич Л. А., Лугаков П. Ф.

При выращивании бездислокационного кремния в его объеме образуются микродефекты различных типов (*A*, *B*, *D*) или не выявляемые селективным травлением мелкие включения [1-3]. Из-за их присутствия изменяется эффективность образования рекомбинационно активных и компенсирующих радиационных дефектов (РД) [3, 4]. В данной работе проанализировано влияние ростовых нарушений структуры, формирующихся при получении бездислокационных кристаллов, на процессы отжига РД.

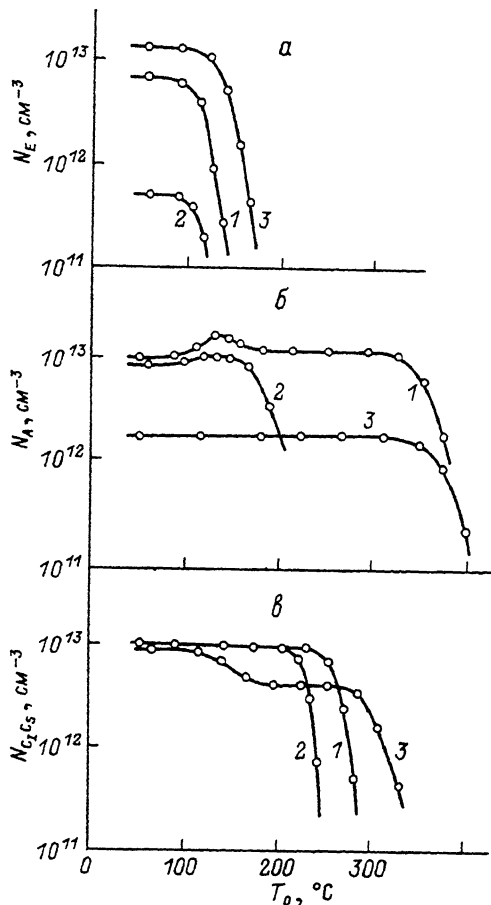
Исследования проводились на бездислокационных монокристаллах кремния *n*-типа, выращенных методом бестигельной зонной плавки двумя способами: в вакууме (первая группа) или в атмосфере аргона (вторая группа). Первые из них содержали ростовые микродефекты типов *A* и *B* в концентрациях $1 \cdot 10^5 \div 1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, а во вторых селективным травлением никаких дефектов выявлено не было. В качестве контрольного использовался полученный в вакууме зонный кремний *n*-типа с плотностью ростовых дислокаций $N_D \approx 2 \times 10^4 \text{ см}^{-2}$. Были подобраны образцы с примерно одинаковым исходным удельным сопротивлением $\rho \approx 100 \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Концентрация фоновых примесей (кислород, углерод), определенная по ИК поглощению, в исследуемых материалах не превышала $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Облучение осуществлялось γ -квантами ^{60}Co при $T_{\text{обл}} < 50 \text{ }^\circ\text{C}$ интегральным потоком $\Phi = 3.6 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$. Облученные кристаллы подвергались изотермическому или 15-минутному изохронному отжигу, на различных этапах которого измерялись температурные (80-400 К) зависимости коэффициента Холла. Обработка результатов холловских измерений проводилась с использованием дифференциальной методики [5].

На рисунке показаны зависимости концентрации *E*-, *A*-центров и комплексов междуузельный углерод—узловой углерод (*C_IC_S*), вносящих в запрещенную зону акцепторные энергетические уровни $E_c - 0.43$, $E_c - 0.19$ и $E_c - 0.16 \text{ эВ}$ [6-8], от температуры отжига T_0 . В таблице приведены опре-

Параметры отжига радиационных дефектов

Группа кристаллов	<i>E</i> -центры		<i>A</i> -центры		Комплексы <i>C_IC_S</i>	
	E_0 , эВ	ν_0 , с ⁻¹	E_0 , эВ	$\nu_0 \cdot 10^{-9}$, с ⁻¹	E_0 , эВ	$\nu_0 \cdot 10^{-8}$, с ⁻¹
Первая	1.25	$5 \cdot 10^{12}$	—	—	1.2	5
Вторая	1.3	$8 \cdot 10^{12}$	1.2	5	1.1	4
Контрольная	0.94	$5 \cdot 10^8$	1.5	2	1.3	3

деленные из данных изотермического или изохронного отжига значения энергии активации отжига E_0 и частотного фактора ν_0 этих дефектов, отжиг которых всегда подчинялся кинетике реакций первого порядка. Видно, что по сравнению с контрольными в исследуемых кристаллах первой и второй групп имеет место ряд особенностей: 1) окончательный отжиг рассматриваемых РД смещен в область более низких температур; 2) сравнительно высокие значения E_0 и ν_0 характерны для *E*-центров, тогда как для *A*-центров и комплексов *C_IC_S* имеет место некоторое уменьшение E_0 , а ν_0 практически не изменяется; 3) в интервале температур $T_0 = 100 \div 150 \text{ }^\circ\text{C}$ наблюдается



Зависимость концентрации дефектов от температуры отжига.

а — E-центры, б — A-центры, в — комплексы C_1C_5 . Группа кристаллов: 1 — первая, 2 — вторая, 3 — контрольная.

увеличение концентрации A-центров, а комплексы C_1C_5 отжигаются в один этап.

Уменьшение температурной устойчивости РД наблюдалось обычно при отжиге облученного кремния, содержащего повышенную плотность искусственно введенных дислокаций ($N_D > 1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$), из-за создаваемых ими полей упругих напряжений и деформации кристаллической решетки [9]. В исследуемых бездислокационных кристаллах источниками деформационных напряжений могут быть не выявляемые селективным травлением мелкие включения [2, 3], которые, возможно, представляют собой «застывшие» при охлаждении первичные междоузельные кластеры [10] и являются фрагментами или предшественниками известных микродефектов (типа B и D) [11]. Создавая в кристаллической решетке кремния анизотропные деформационные напряжения, включения оказываются, как и микродефекты [12], окруженными примесной атмосферой, и к ним мигрируют генерируемые облучением вакансии и собственные междоузельные атомы. Здесь они участвуют в комплексообразовании с фоновыми примесями, и вблизи включений эффективно накапливаются A-центры и комплексы C_1C_5 [3, 4]. При используемом для облучения интегральном потоке γ -квантов значительная часть E-центров также оказывается сосредоточенной в ближайшем окружении включений (в зоне действия их упругих напряжений) [4], в силу

чего и наблюдается уменьшение температуры отжига РД, находящихся в деформированной включениями области кристаллической решетки. E -центры в зонном малодислокационном кремнии n -типа, содержащем ростовые дислокации, обычно отжигаются за счет миграции как целого к стокам с энергией активации отжига $E_0 \approx 0.95$ эВ и частотным фактором $\nu_0 \approx 10^9$ с⁻¹ [13]. При этом E -центры взаимодействуют как с междоузельными комплексами $C_I C_S$, что обуславливает двухэтапный отжиг последних, так и между собой, в результате чего формируются более стабильные фосфоросодержащие РД (комплексы фосфор—дивакансия) [14]. В исследуемых бездислокационных кристаллах первой и второй групп наблюдается только один этап отжига комплексов $C_I C_S$ и не происходит образования комплексов фосфор—дивакансия. Эти экспериментальные факты свидетельствуют об отсутствии взаимодействия E -центров с РД междоузельного типа и друг с другом. Поэтому можно считать, что в деформированной области кристалла вблизи включений изменяется механизм отжига E -центров, т. е. в данном случае они отжигаются путем развала (диссоциации), о чем свидетельствуют, как видно из таблицы, более высокие значения E_0 и ν_0 [15]. При диссоциации E -центров освобождающимся вакансиям представляется возможность взаимодействовать с атомами кислорода, входящими в состав примесной атмосферы включений. В результате при отжиге в интервале температур $T_0 = 100 \div 150$ °С концентрация A -центров увеличивается, как это следует из данных эксперимента. Отметим, что наблюдается не только совпадение температурных интервалов отжига E -центров и дообразования A -центров, но и равенство их концентраций. Полная перестройка E -центров в A -центры свидетельствует об отсутствии миграции вакансий на стоки, а формирующиеся при выращивании бездислокационного кремния мелкие включения, как и предполагалось ранее [4], не являются центрами исчезновения пар Френкеля. Часть A -центров, накапливающихся вблизи включений в более искаженной области, отжигается при $T_0 > 150 \div 200$ °С, что сопровождается образованием дефектов с акцепторным энергетическим уровнем $E_c = 0.45$ эВ (комплексов углерод—кислород—дивакансия), которые обычно наблюдаются в кремнии, выращенном по методу Чохральского [16]. В исследуемых кристаллах такая перестройка кислородосодержащих комплексов обусловлена повышенной локальной концентрацией фоновых примесей вблизи включений. Заметим также, что механизм отжига A -центров и комплексов $C_I C_S$ не меняется при наличии мелких включений, создающих деформационные напряжения. Об этом свидетельствуют одинаковые значения ν_0 в контрольном кремнии и образцах первой и второй групп. Уменьшение E_0 (а тем самым и температуры отжига) у A -центров и комплексов $C_I C_S$ в исследуемых бездислокационных кристаллах связано с изменением (уменьшением) энергии связи или энергии миграции РД при наличии деформации кристаллической решетки.

В заключение отметим, что концентрацией, размерами и составом примесной атмосферы включений определяется степень их влияния на процессы отжига РД. В силу этого и имеет место некоторое различие параметров отжига РД в кристаллах первой и второй групп, условия выращивания которых (атмосфера аргона или вакуум) были не одинаковыми.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Рейви К. Дефекты и примеси в полупроводниковом кремнии. М., 1984. 472 с.
- [2] Junichi C. // Def. a Prop. Semicond.: Def. Eng. Symp. Def. Qual. Semicond. Tokyo, 1987. P. 143—153.
- [3] Kolkovskii I. I., Lugakov P. F., Shusha V. V. // Phys. St. Sol. (a). 1991. V. 127. N 1. P. 103—109.
- [4] Казакевич Л. А., Лугаков П. Ф. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 1. С. 110—113.
- [5] Hoffman H. // J. Appl. Phys. 1979. V. 19A. N 3. P. 307—312.
- [6] Watkins G. D., Corbett J. W. // Phys. Rev. 1961. V. 121. N 4. P. 1001—1014.
- [7] Watkins G. D., Corbett J. W. // Phys. Rev. 1964. V. 134A. N 5. P. 1359—1377.
- [8] Watkins G. D., Brower K. L. // Phys. Rev. Lett. 1976. V. 36. N 22. P. 1329—1332.
- [9] Kazakevich L. A., Lugakov P. F. // Phys. St. Sol. (a). 1982. V. 74. N 1. P. 113—122.

- [10] Voronkov V. V. // J. Cryst. Growth. 1982. V. 59. P. 625—643.
 [11] Шейхет Э. Г., Червоный И. Ф., Фалькевич Э. С. // Высококичст. вещества. 1989. № 2. С. 50—55.
 [12] Критская Т. В., Неймарк К. Н., Шкляр Б. Л. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1986. Т. 22. В. 6. С. 1038—1039.
 [13] Kimerling L. C., DeAngelis H. M., Diebold J. W. // Sol. St. Commun. 1975. V. 16. N 1. P. 171—174.
 [14] Лугаков П. Ф., Лукьяница В. В. // ФТП. 1983. Т. 17. В. 1. С. 166—168.
 [15] Емцев В. В., Машовец Т. В. Преси и точечные дефекты в полупроводниках. М., 1981. 248 с.
 [16] Лугаков П. Ф., Лукашевич Т. А., Шуша В. В. // ФТП. 1979. Т. 13. В. 2. С. 401—404.

Научно-исследовательский институт
 прикладных физических проблем
 им. А. Н. Севченко при БГУ им. В. И. Ленина
 Минск

Получено 25.10.1991
 Принято к печати 16.01.1992

ФТП, том 26, вып. 6, 1992

ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК α -Si : H-ФОТОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ С ЗЕРКАЛЬНО ОТРАЖАЮЩИМ ТЫЛЬНЫМ КОНТАКТОМ

Манаков С. М., Таурбаев Т. И.

Изменения свойств аморфного гидрогенизированного кремния (α -Si : H) с температурой оказывают существенное влияние на фотоэлектрические характеристики приборов, изготовленных на его основе [1].

Цель настоящей работы — исследование влияния температуры на фотоэлектрические характеристики структур на основе α -Si : H с зеркально отражающим тыльным контактом.

С повышением температуры оптическая ширина запрещенной зоны E_g α -Si : H уменьшится с температурным коэффициентом $\gamma = -(4.4 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$ эВ/К при температурах, превышающих 200 К для всех образцов α -Si : H независимо от метода его получения [2]. Таким образом, температурную зависимость $E_g(T)$ можно выразить соотношением

$$E_g(T) = E_g^0 + \gamma(T - T_K), \quad (1)$$

где E_g^0 — оптическая ширина запрещенной зоны при комнатной температуре T_K .

С учетом интерференции между падающим и отраженным от тыльного контакта светом и, принимая во внимание соотношение, описывающее спад коротковолновой чувствительности из-за диффузии носителей против электрического поля [3], в работе [4] мы получили выражение для спектральной зависимости коэффициента сбора:

$$Q(\lambda) = 1 - \exp(-\alpha W) + \frac{\sqrt{R}}{2\pi} \lambda \alpha \exp(-2\alpha d) \left\{ \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} dn\right) - \right. \\ \left. - \sin\left[\frac{4\pi}{\lambda}(d - W)n\right] \right\} + R \exp(-2\alpha d) [\exp(\alpha W) - 1] - 1/(1 + eV_b/\alpha WkT), \quad (2)$$

где R — коэффициент отражения тыльного контакта; α и n — коэффициенты поглощения и преломления α -Si : H, зависящие от длины волны λ ; W и d — толщины области сбора и слоя α -Si : H соответственно; V_b — встроенный потенциал; e — заряд электрона. Изготовление исследуемых структур (SnO_2 - α -Si :