

УДК 621.315.592

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНАМИ НА ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛЕГИРОВАННЫХ ГЕРМАНИЕМ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ

Дашевский М. Я., Корляков Д. Н., Ладыгин Е. А.,
Мусалитин А. М., Шилин Б. А.

Исследованы бездислокационные монокристаллы кремния, легированного германием ($N_{\text{Ge}}=10^{20} \text{ см}^{-3}$) и нелегированного, n - и p -типа проводимости, выращенные по методу Чохральского в направлении $\langle 111 \rangle$. Концентрации фосфора или бора составили $\sim 10^{14}$ и 10^{15} см^{-3} в монокристаллах соответственно n - и p -типа. Полученные монокристаллы подвергали облучению быстрыми электронами ($E=6 \text{ МэВ}$) потоками $D=5 \cdot 10^{12} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$, а затем изохронному отжигу в течение 30 мин в температурном интервале $200 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Обнаружено, что процессы образования радиационных дефектов в монокристаллах кремния, легированного германием, протекают не так, как в нелегированном кремнии. Введение германия в монокристаллический кремний несколько снижает его радиационную чувствительность и способствует восстановлению (после отжига) времени жизни неосновных носителей заряда в облученном материале.

Известно, что после радиационной обработки в монокристаллах кремния наблюдается значительное изменение электрофизических параметров [1].

Ранее обнаружено, что введение германия в монокристаллический кремний может повышать термическую устойчивость концентрации и подвижности основных носителей заряда (ОНЗ) [2], времени жизни неосновных носителей заряда (ННЗ) [3]. В работах [4, 5] показано, что германий влияет на процессы образования радиационных дефектов в монокристаллическом кремнии.

Целью данной работы является сравнительное исследование влияния облучения быстрыми электронами ($E=6 \text{ МэВ}$) на физические свойства монокристаллов кремния, легированного германием и нелегированного.

Объекты и методики исследования

Были исследованы бездислокационные монокристаллы кремния, легированного германием и нелегированного, n - и p -типа проводимости, выращенные в направлении $\langle 111 \rangle$ по методу Чохральского. Исследовались образцы p -типа проводимости, легированные бором (образец 1, концентрация бора $N_{\text{B}} \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$) и одновременно бором и германием (образец 2, концентрации бора и германия $N_{\text{B}} \sim 10^{15}$, $N_{\text{Ge}}=10^{20} \text{ см}^{-3}$), а также образцы n -типа проводимости, легированные фосфором (образец 3, концентрация фосфора $N_{\text{P}} \sim 1.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) и одновременно фосфором и германием (образец 4, концентрации фосфора и германия $N_{\text{P}}=10^{14}$, $N_{\text{Ge}}=10^{20} \text{ см}^{-3}$). Некоторые свойства исследуемых монокристаллов приведены в табл. 1.

Монокристаллы были подвергнуты облучению электронами с энергией $E=6 \text{ МэВ}$ и потоками $D=5 \cdot 10^{12} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$ на воздухе (плотность потока электронов составила $1.5 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$). Температура образцов в ходе облучения не превышала $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Далее на облученных образцах проводили изохронный отжиг в течение 30 мин в температурном интервале $200 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ в вакууме.

С облученных и отожженных образцов перед измерениями физических свойств удаляли слой $\sim 50 - 100 \text{ мкм}$. Концентрацию (n , p) и подвижность (μ) ОНЗ

Таблица 1
Свойства исходных образцов

№ образца	Концентрация кислорода $N_O \cdot 10^{-17}, \text{см}^{-3}$	Концентрация углерода $N_C \cdot 10^{-17}, \text{см}^{-3}$	Электрофизические свойства (при 300 К)		
			концентрация ОНЗ $n(p), \text{см}^{-3}$	подвижность ОНЗ $\mu, \text{см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$	время жизни ННЗ $\tau, \text{мкс}$
1	10	1.6	10^{15}	280	95
2	14	1.6	10^{15}	260	80
3	7.6	3.4	$1.1 \cdot 10^{14}$	1050	330
4	7.1	1.3	10^{14}	1100	370

рассчитывали из измерений коэффициента Холла и удельного сопротивления методом Ван-дер-Пау на образцах размерами 10×10 мм. Ошибки определения величин $n(p)$ и μ составили ± 8 и $\pm(13-14)$ % соответственно. Время жизни ННЗ измеряли методом Шпитцера и методом спада фотопроводимости с ошибкой $\pm(15-20)$ %. Оптические спектры пропускания снимали дифференциальным методом на спектрофотометре UR-20 в интервале волновых чисел 450—2000 см^{-1} . Концентрации кислорода и удельного углерода определяли из величин коэффициентов поглощения при волновых числах $\vartheta=1106$ и 605 см^{-1} соответственно. Ошибка определения ± 20 %. Кроме того, были определены коэффициенты поглощения при $\vartheta=515$ (полоса, связанная с одним из состояний кислорода в кремнии [6]) и $\vartheta=830$ см^{-1} [полоса, связанная с поглощением на комплексе (V—O) [7]]. Ошибки определения коэффициентов поглощения на «кислородной» и «углеродной» полосах ($\vartheta=1106, 605, 515$ см^{-1}) составили $\pm(5-8)$ %, а для коэффициента поглощения при $\vartheta=830$ см^{-1} — $\pm(10-14)$ %.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости концентрации ОНЗ в монокристаллах кремния и кремния, легированного германием, от величины потока облучения. Отметим на этих кривых два участка: 1) относительной устойчивости концентрации ОНЗ к облучению электронами (потоки менее $D_{кр}$), 2) резкого падения концентрации ОНЗ в облученных монокристаллах, причем этот процесс наблюдается в монокристаллах Si<Ge> при меньших «критических» потоках $D_{кр}$, но с меньшей скоростью падения концентрации ОНЗ, чем в нелегированном кремнии.

На рис. 2 приведены зависимости подвижности ОНЗ в монокристаллах Si и Si<Ge> от величины потока облучения. Здесь также отметим два участка: 1) слабого падения подвижности ОНЗ, 2) резкого возрастания подвижности ОНЗ в облученных большими потоками монокристаллах.

На рис. 3 приведены зависимости времени жизни ННЗ в монокристаллах Si и Si<Ge> от величины потока облучения. Заметим, что введение германия несколько повышает радиационную стойкость кремния по отношению к изменению времени жизни ННЗ.

В табл. 2, 3 анализируются электрофизические свойства облученных монокристаллов Si и Si<Ge>, подвергнутых изохронному отжигу. Видно, что скорость восстановления концентрации ОНЗ в монокристаллах нелегированного кремния выше, чем в монокристаллах Si<Ge>. Однако скорость восстановления времени жизни ННЗ выше в монокристаллах Si<Ge>, причем влияние германия на восстановление концентрации ОНЗ и времени жизни ННЗ усиливается с ростом потока облучения.

В табл. 4 и на рис. 4, 5 представлены данные о некоторых оптических свойствах исследуемых образцов. Отметим следующее.

1) Концентрация кислорода с ростом потока облучения остается постоянной в монокристаллах Si и Si<Ge>.

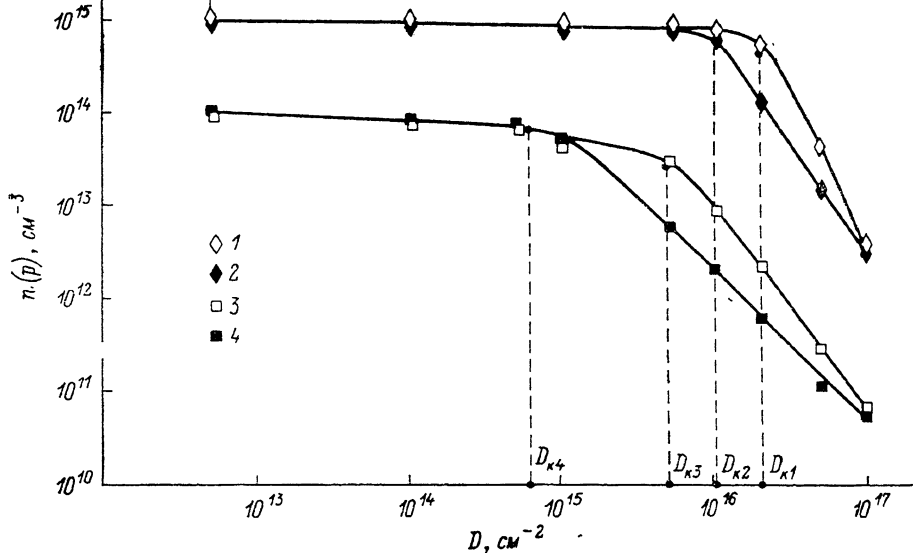


Рис. 1. Зависимости концентрации ОНЗ от потока облучения электронами монокристаллов Si и Si<Ge> (D_k — критический поток).

1—4 здесь и на рис. 2, 3 соответствуют номерам образцов.

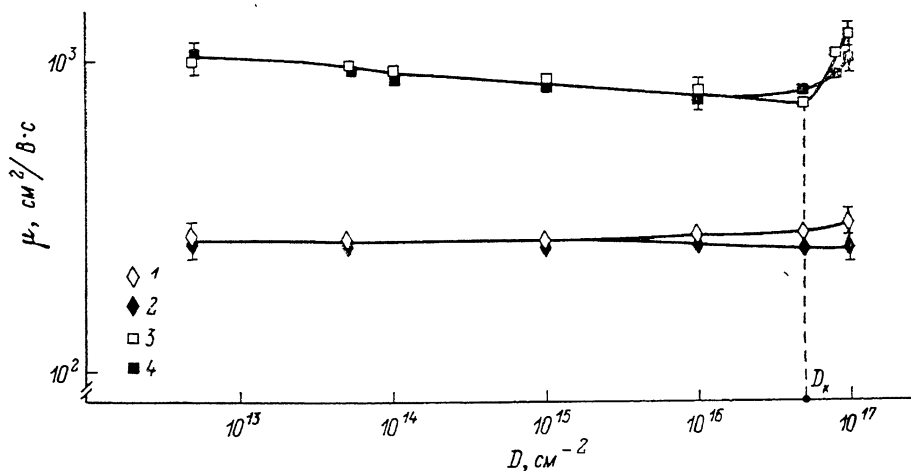


Рис. 2. Зависимости подвижности ОНЗ от потока облучения электронами монокристаллов Si и Si<Ge> (D_k — критический поток).

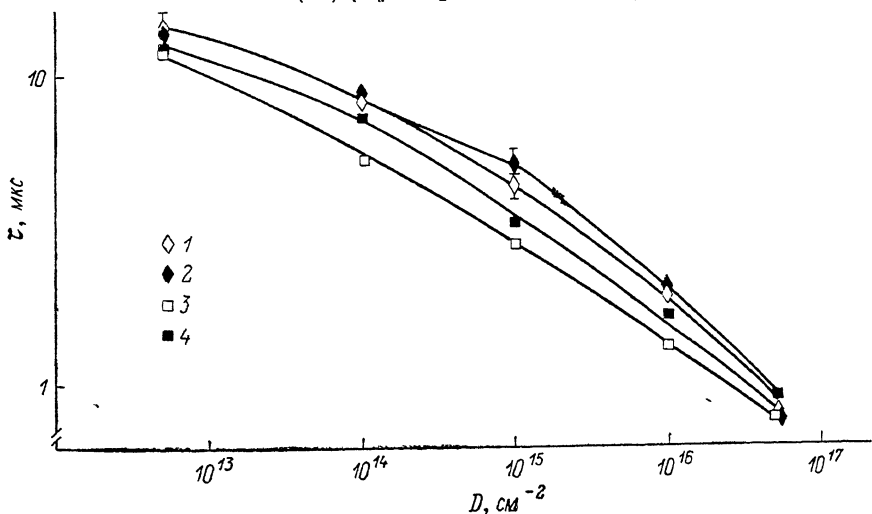


Рис. 3. Зависимости времени жизни ННЗ от потока облучения электронами монокристаллов Si и Si<Ge>.

Таблица 2

Время жизни ННЗ (τ , мкс)
облученных монокристаллов ($D=5 \cdot 10^{12}$ см⁻²)
после изохронного отжига в течение 30 мин

№ образца	После облучения	После облучения (температура отжига, °С)			
		500	700	900	1000
1	14.5	—	25	2.5	1.8
2	14.0	—	42	4.4	3.2
3	12.0	46	9.2	9.2	—
4	12.5	62	7.3	5.8	—

Примечание. Концентрация и подвижность ННЗ в облученных монокристаллах 1—4 ($D=5 \cdot 10^{12}$ см⁻²) после изохронного отжига не изменялись.

2) Скорость введения А-центров (V—O) при облучении электронами несколько выше в монокристаллах нелегированного кремния по сравнению с монокристаллами Si<Ge>.

3) В монокристаллах нелегированного кремния концентрация узельного углерода с ростом потока облучения ведет себя немонотонно: при малых пото-

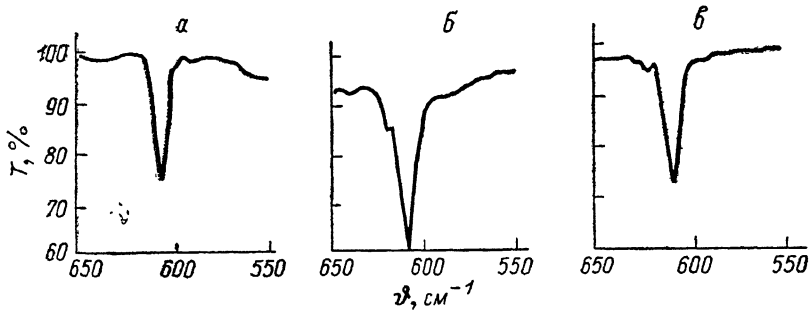


Рис. 4. Спектры ИК пропускания в образце 1 (Si, p-тип).

Образцы: а — исходный, б, в — облученный. D , см⁻²: б — $5 \cdot 10^{18}$, в — 10^{17} .

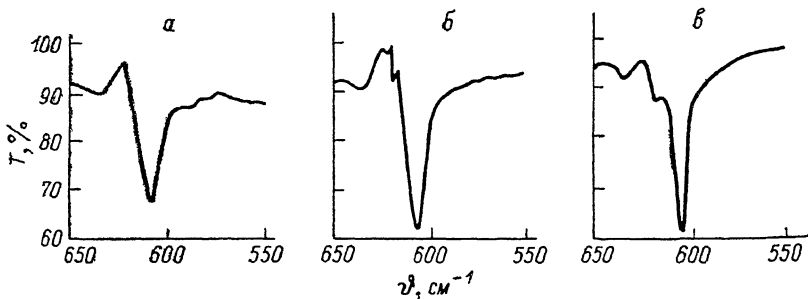


Рис. 5. Спектры ИК пропускания в образце 2 (Si<Ge>, p-тип).

а—в — то же, что и на рис. 4.

ках она растет, а при больших потоках падает (при этом полуширина «углеродного» пика в основном возрастает). В монокристаллах Si<Ge> концентрация узельного углерода с ростом потока облучения постоянно растет (при этом полуширина углеродного пика в основном уменьшается).

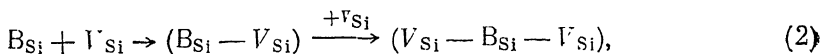
Из рис. 1—3 следует, что облучение быстрыми электронами монокристаллического кремния приводит к интенсивной генерации в последнем неравновесных френкелевских пар ($V_{Si}+Si_i$), являющихся первичными радиационными дефектами. Наряду с этим протекают процессы комплексобразования точеч-

Т а б л и ц а 3

Электрофизические свойства облученных монокристаллов
($D=10^{17}$ см $^{-2}$) после изохронного отжига в течение 30 мин

№ образца	Температура отжига, °С	Электрофизические свойства (при 300 К)		
		концентрация ОНЗ $n(p)$, см $^{-3}$	подвижность ОНЗ μ , см $^2/V \cdot c$	время жизни ННЗ τ , мкс
1	После облучения	$4.5 \cdot 10^{12}$	310	0.8
	700	$4.6 \cdot 10^{14}$	295	10.3
	900	$9.4 \cdot 10^{14}$	280	10.0
	1000	10^{15}	280	9.2
2	После облучения	$3.5 \cdot 10^{12}$	255	0.8
	700	$6.3 \cdot 10^{14}$	270	38
	900	$7.5 \cdot 10^{14}$	245	17.9
	1000	$8.9 \cdot 10^{14}$	250	14.2
3	После облучения	$7.7 \cdot 10^{10}$	1230	0.8
	500	$3.9 \cdot 10^{13}$	1100	23
	700	10^{14}	1000	8.3
	900	$1.3 \cdot 10^{14}$	910	2.8
4	После облучения	$6.4 \cdot 10^{10}$	1030	0.9
	500	$6.4 \cdot 10^{12}$	1100	50
	700	10^{14}	1115	30
	900	$1.2 \cdot 10^{14}$	1000	9.0

ных дефектов. В частности, возможны следующие квазихимические реакции [1, 6, 9]:



Эти процессы приводят к уменьшению концентрации ОНЗ и возрастанию подвижности ОНЗ при облучении монокристаллов кремния потоками, большими некоторой критической величины D_k .

Однако в монокристаллах Si<Ge> процессы образования радиационных дефектов протекают, по-видимому, несколько иначе. С одной стороны, введение германия как изовалентной примеси с большим, чем у кремния, ковалентным радиусом уменьшает энтальпию образования френкелевских пар и тем самым увеличивает концентрацию радиационных дефектов (к примеру, вакансий), а, с другой стороны, в монокристаллах Si<Ge> могут наблюдаться процессы «внутреннего» геттерирования [2, 3] и комплексообразования с германием радиационных дефектов [4, 5]. Первый фактор может объяснять меньший критический поток D_k в монокристаллах Si<Ge>, при котором наблюдается уменьшение концентрации электронов и дырок после облучения. Второй фактор объясняет замедление скорости уменьшения концентрации электронов и дырок при облучении монокристаллов Si<Ge> потоками, большими D_k , а также несколько более высокую радиационную стойкость величины времени жизни ННЗ в последнем. Этот же фактор может явиться причиной замедления формирования А-центров в облученных монокристаллах Si<Ge> (табл. 4).

Анализ результатов табл. 2, 3 позволяет сделать следующие выводы.

1) Замедление восстановления в результате отжига концентрации ОНЗ в монокристаллах Si<Ge> связано, по-видимому, с увеличением концентрации радиационных дефектов за счет уменьшения энтальпии образования пар Френ-

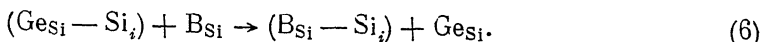
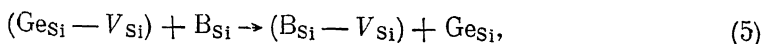
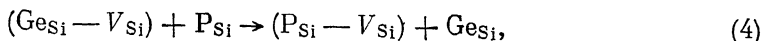
Таблица 4

Оптические свойства облученных образцов

№ образца	D, см ⁻²	Коэффициент поглощения при λ , см ⁻¹				Концентрация углерода $N_C \cdot 10^{-17}$, см ⁻³
		1106 α_{1106} , см ⁻¹	530 α_{530} , см ⁻¹	830 α_{830} , см ⁻¹	605 α_{605} , см ⁻¹	
1	0	3.1	0.64	0	1.45	1.6
	10 ¹⁵	3.1	0.64	0	1.5	1.7
	5 · 10 ¹⁶	3.1	0.65	0.31	2.05	2.3
	10 ¹⁷	3.05	0.68	0.38	1.7	1.9
2	0	4.3	1.1	0	1.4	1.6
	10 ¹⁵	4.3	1.0	0	1.45	1.6
	5 · 10 ¹⁶	4.25	1.0	0.25	2.1	2.3
	10 ¹⁷	4.3	1.05	0.3	2.7	3.0
3	0	2.3	0.5	0	3.1	3.4
	10 ¹⁵	2.3	0.5	0	3.4	3.7
	5 · 10 ¹⁶	2.1	0.55	0.2	3.6	4.0
	10 ¹⁷	2.05	0.6	0.22	2.9	3.2
4	0	2.15	0.5	0	1.3	1.5
	10 ¹⁵	2.15	0.5	0	1.4	1.5
	5 · 10 ¹⁶	2.15	0.45	0.11	1.65	1.8
	10 ¹⁷	2.15	0.4	0.16	2.3	2.5

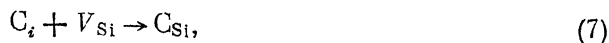
Примечание. Переводный коэффициент при расчете концентрации углерода браши $1.1 \cdot 10^{17}$.

кея в этом материале, а также, возможно, за счет протекания квазихимических реакций типа

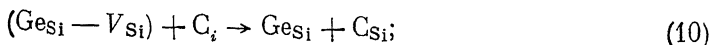
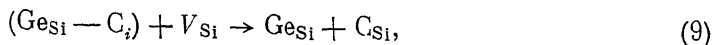


2) Значительное повышение в результате отжига времени жизни NH_3 (особенно при больших потоках облучения материала) в монокристаллах $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$, вероятно, объясняется наличием в последних геттеризирующих центров [2, 3].

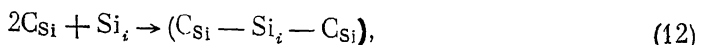
Из результатов, представленных в табл. 4 и на рис. 4, 5, следует что в монокристаллах кремния при малых потоках облучения и в монокристаллах $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$ при больших потоках облучения концентрация узельного углерода (с ростом потока облучения) растет, что может быть объяснено протеканием следующих квазихимических реакций в монокристаллах Si:



в монокристаллах $\text{Si}\langle\text{Ge}\rangle$



уменьшение концентрации узельного углерода наблюдается в нелегированном кремнии при больших потоках облучения, когда возможны реакции типа [8]



Выводы. Обнаружено, что процессы образования вторичных дефектов при облучении электронами больших энергий в монокристаллах Si<Ge> протекают не так, как в нелегированном кремнии.

Показано, что введение германия ($N_{Ge}=10^{20}$ см⁻³) в монокристаллический кремний несколько снижает радиационную чувствительность и существенно улучшает восстановление после отжига времени жизни неосновных носителей заряда в облученном материале.

Список литературы

- [1] Действие проникающей радиации на изделия электронной техники / Под ред. Е. А. Ладыгина. М., 1980. 162 с.
- [2] Дашевский М. Я., Докучаева А. А., Корляков Д. Н., Салманов А. Р., Хашимов Ф. Р. // Изв. АН СССР. Неорг. матер. 1988. Т. 24. В. 9. С. 1413—1418.
- [3] Дашевский М. Я., Корляков Д. Н., Миляев В. А., Никитин В. А. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 6. С. 1146—1149.
- [4] Итальянцев А. Г., Курбаков А. И., Мордкович В. Н., Рубинова Э. Э. // ФТП. 1988. Т. 22. В. 5. С. 834—838.
- [5] Белокурова И. Н., Рогоцкий И. С., Шаховцов В. И. // Легированные полупроводниковые материалы. М., 1985. С. 173—177.
- [6] Pajot V., Stein H. J., Cales B., Naud C. // J. Electrochem. Soc. 1985. V. 132. N 12. P. 3034—3037.
- [7] Lindstrom J. L., Oehrlein G. S., Corbett J. W. // Phys. St. Sol. (a). 1986. V. 95. N 1. P. 179—184.
- [8] Asom M. T., Benton J. L., Sauer R., Kimerling L. C. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 4. P. 256—258.
- [9] Mulvaney B. J., Richardson W. B. // Appl. Phys. Lett. 1987. V. 51. N 8. P. 1439—1441.

Московский институт
стали и сплавов

Получена 20.03.1990
Принята к печати 21.05.1990