

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА, ОБЛУЧЕННЫХ РАЗНЫМИ ДОЗАМИ БЫСТРЫХ НЕЙТРОНОВ

Г. Г. МАНУКЯН, Р. М. АБРАМЯН

Проведено исследование радиальной неоднородности электрофизических параметров облученных монокристаллов кремния. Показана возможность регулирования и улучшения свойств материала дозированием облучения. Проведена статистическая оценка влияния облучения на электрофизические параметры.

Известно, что обычные методы легирования не обеспечивают в необходимой степени однородность распределения легирующих примесей, что отрицательно сказывается на рабочих параметрах СПП.

Целью настоящей работы является получение в монокристаллах кремния путем облучения электрически активных и равномерно распределенных по объему устойчивых дефектов. В связи с этим изучены изменения распределения значений электрофизических параметров в зависимости от дозы реакторного облучения быстрыми нейтронами и температурных обработок, а также приведены результаты рентгено топографических исследований, иллюстрирующие геометрию радиационных нарушений, возникающих в кремнии при облучении.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исследовалось влияние облучения на радиальную неоднородность удельного сопротивления ρ и времени жизни τ неосновных носителей заряда, а также структурные изменения монокристаллов кремния методом рентгеновской топографии.

Для исследования использовались кремниевые пластины n -типа, легированные фосфором с концентрацией $8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Пластины вырезались перпендикулярно к направлению (111) из слитка монокристаллического кремния диаметром 30 мм, используемого в производстве СПП. Толщина образцов составляла не более 1 мм. Средняя плотность дислокаций, определенная методом избирательного травления, составляла $\sim 1 \cdot 10^2 \text{ см}^{-2}$.

Ранее было обнаружено [1], что при облучении монокристаллов кремния происходит уменьшение разбросов электрофизических параметров. С целью определения набора доз, при котором происходит наибольшее уменьшение разбросов, облучение образцов проводилось таким образом, что выбранные дозы не сильно различались друг от друга. Каждая серия образцов, вырезанных из одного и того же слитка, облучалась при температуре примерно 50°C следующими пятью различными дозами:

$4 \cdot 10^{11}$, $8 \cdot 10^{11}$, $2 \cdot 10^{12}$, $6 \cdot 10^{12}$ и $1 \cdot 10^{13}$ н см⁻². Измерения разбросов ρ и τ до и после облучения образцов проводились по методикам, описанным в работе [1].

После измерения значений этих параметров за меру неоднородности распределения величин $x(\rho, \tau)$ принимались коэффициенты вариации W , определяемые соотношением

$$W = \frac{S}{\bar{x}} = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^l (x_i - \bar{x})^2}{l-1}},$$

где S — среднеквадратичное отклонение значений исследуемого параметра, $\bar{x}$ — среднее арифметическое значение x по всему диаметру образца, x_i — значение x для данного радиуса r_i , l — число точек радиуса r_i , в которых проводились измерения.

Следует заметить, что W дает более точное представление об однородности электрофизических свойств полупроводникового материала, чем соотношение $\frac{\Delta x}{x}$ или $\frac{x_{\max} - x_{\min}}{x_{\max} + x_{\min}}$.

Наибольшее уменьшение W для значений ρ происходит при облучении дозой $1 \cdot 10^{13}$ н см⁻² (см. таблицу). Это указывает на повышение одно-

Таблица

№ образцов	Доза облучения (н см ⁻²)	Коэффициенты вариации W (в %)							
		до облучения		после облучения		после облучения и отжига при 420°C		после облучения и отжига при 820°C	
		W_ρ	W_τ	W_ρ	W_τ	W_ρ	W_τ	W_ρ	W_τ
1	$4 \cdot 10^{11}$	3,6	15,1	3,2	4,5	2,8	7,4	1,7	4,1
2	$8 \cdot 10^{11}$	2,7	16,5	2,6	2,7	1,7	5,5	2,7	7,4
3	$2 \cdot 10^{12}$	3,0	7,3	3,5	3,8	2,3	6,8	1,8	6,2
4	$6 \cdot 10^{12}$	3,2	9,0	3,3	6,5	2,2	2,6	2,5	5,7
5	$1 \cdot 10^{13}$	3,0	14,7	1,7	3,9	1,6	4,6	1,6	3,0

родности монокристаллов кремния по этому параметру. Наблюдаемое при этом увеличение абсолютных значений ρ укладывается в рамки полученных результатов по измерению концентраций носителей зарядов n , определяемых значениями коэффициентов Холла. Уменьшение n , вероятно, было связано с увеличением числа дефектов, служащих «ловушками» для носителей заряда.

Полученные результаты для τ свидетельствуют о том, что этот параметр по сравнению с ρ более подвержен влиянию облучения и, как было обнаружено, уменьшение W для значений τ происходит при всех дозах облучения. В использованном интервале доз наибольшее уменьшение W для значений τ происходит при второй дозе облучения.

Для выяснения устойчивости радиационных дефектов к режимам термообработок, предусмотренных в технологии изготовления СПП, проводился отжиг образцов. Изохронный отжиг с длительностью выдержки, равной 3 часам, при температурах 420 и 820°C проводился в кварцевых ампулах в диффузионной печи. Вакуум в ампулах был не хуже 10^{-4} тор.

По мере отжига отдельных центров рекомбинации электрофизические параметры облученного материала приближались к своим первоначальным значениям. Однако даже отжиг при 820°C не приводил к восстановлению значений ρ . Полученные результаты подтверждаются также результатами измерений n в облученных образцах, отожженных при указанных температурах, чего, однако, нельзя сказать об абсолютных величинах значений τ , которые не только восстанавливались, но и в некоторых случаях увеличивались по сравнению с исходными.

Значения W , приведенные в таблице, характеризуют изменения разбросов ρ и τ в образцах от каждой серии как функции средних значений параметров до и после облучения и последующих термообработок. Как следует из представленных здесь результатов, облучение быстрыми реакторными нейтронами по крайней мере дозой не менее чем $1 \cdot 10^{13}$ н.см⁻², а также последующая термообработка приводят к повышению однородности распределения электрофизических параметров в монокристаллах кремния.

При облучении монокристаллов кремния быстрыми нейтронами образовавшиеся дефекты проявляются не только в изменении его электрофизических свойств, но и приводят также к изменениям структуры материала, отображаемым на рентгенофотограммах. Это дает возможность оценить нарушения решетки, вносимые радиационными дефектами (РД).

Рентгенофотограммы монокристаллов кремния получены методом Ланга. Использовано излучение MoK_{α} и отражение от плоскости (220). Последовательно получены топограммы одних и тех же образцов в исходном состоянии, после облучения и последующих термообработок. Полученные топограммы, дающие представление о пространственном расположении дефектов, в частности, дислокаций, также свидетельствуют о том, что облучение приводит к выявлению новых дислокаций с плотностями, зависящими от дозы облучения. Наблюдаемые при указанных выше дозах облучения дифракционные эффекты связаны, по-видимому, с наличием малых концентраций внедренных атомов и вакансий, обладающих рассеивающей способностью и приводящих к искажению решетки (рис. 1). Тем не менее прирост плотности дислокаций соответствующим образом связан с их исходной плотностью.

Из топограмм видно, что с увеличением дозы облучения плотность дислокаций увеличивается (рис. 2). Кроме того, при одинаковой дозе облучения образцов с разными исходными плотностями дислокаций наблюдаемый прирост плотности структурных нарушений разный. В кристаллах с большей исходной плотностью дислокаций наблюдается больший прирост плотности.

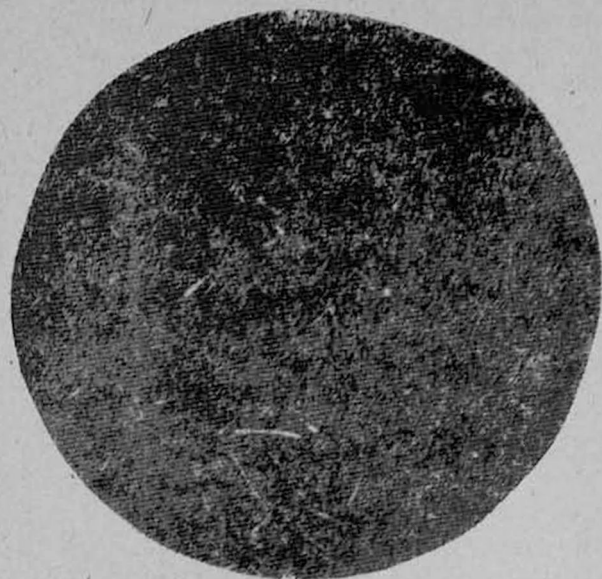


Рис. 1. Рентгенофотограмма образца после облучения потоком быстрых нейтронов $4 \cdot 10^{11}$ н см⁻².

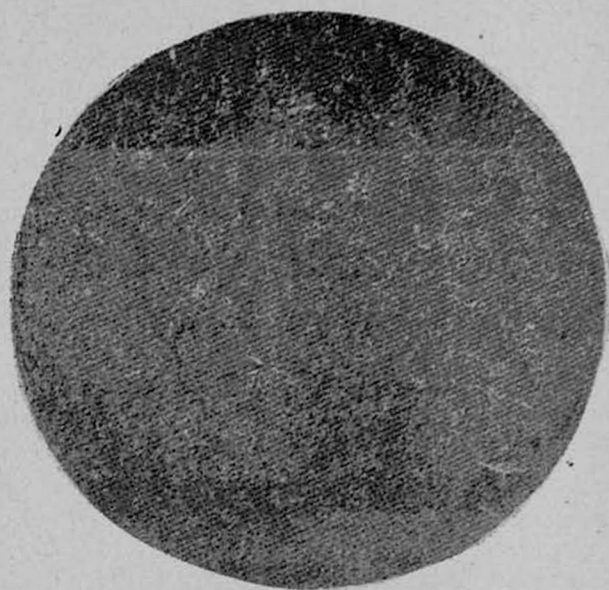


Рис. 2. Рентгенофотограмма образца после облучения потоком $1 \cdot 10^{13}$ н см⁻².

Относительные изменения плотности дислокаций и их формы, очевидно, зависят от концентраций взаимодействующих радиационных и исходных структурных дефектов. Это было обнаружено при изменении условий облучения, меняющих эффективность взаимодействий (рис. 2).

Радиационные дефекты, идентичные дополнительным центрам рассеяния, совместно с исходными дефектами решетки приводят к различным относительным уровням насыщения плотности дефектов в структуре. Рентгенотопографирование бездислокационных образцов не выявляет каких-либо структурных изменений, тогда как в дислокационных и малодислокационных образцах эти изменения очевидны. Помимо электрофизических измерений топограммы отоженных образцов также подтверждают устойчивость РД вплоть до температуры 820°C.

Резюмируя изложенное, можно предположить, что достигнутая под воздействием проникающих быстрых нейтронов однородность при указанных дозах облучения связана с перераспределением ранее существовавших в составе исходного материала микропримесей и дислокаций. Иными словами, облучение нейтронами при таких дозах вносит в структуру не только электрически активные РД, но и влечет за собой перераспределение дефектов в исходном материале. По-видимому, именно это и определяет конечные электрофизические свойства облученных монокристаллов кремния.

Путем отжига при указанных температурах возможно изменение влияния РД, возникающих при облучении. Кроме того, при высоких температурах отжига становится достаточно большим коэффициент диффузии примесных атомов, так что их максимальная концентрация в узлах решетки будет равна равновесной растворимости.

Проведенное исследование показывает, что облучение в сочетании с термообработкой приводит к устойчивому и равномерному распределению дефектов в монокристаллах кремния, используемых в СПП технике.

Авторы признательны Э. М. Казаряну за ценные советы и обсуждение результатов и В. А. Харченко за проведение облучения образцов.

СКТБ ПТ, г. Ереван
Ереванский политехнический
институт

Поступила 7.II.1979

ЛИТЕРАТУРА

1. Р. М. Абрамян и др. Изв. АН АрмССР, Физика, 12, 294 (1977).

ԱՐԱԳ ՆՅՅՏՐՈՆՆԵՐԻ ՏԱՐԲԵՐ ԴՈՋԱՆԵՐՈՎ ՃԱՌԱԳԱՅԹՎԱԾ
ՄԵԾ ՏՐԱՄԱԳԾՈՎ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԻ ՄԻԱՔՅՈՒՐԵՂՆԵՐԻ
ԷԼԵԿՏՐԱՖԻԶԻԿԱԿԱՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ ԲԱՇԽՎԱԾՈՒԹՅՈՒՆԸ

Գ. Գ. ՄԱՆՈՒԿՅԱՆ, Ռ. Մ. ԱՐՐԱՀԱՄՅԱՆ

Կատարված է ճառագայթված սիլիցիումի միարյուրեղների էլեկտրաֆիզիկական հատկությունների շտապիղային անհամասեռության ուսումնասիրություն: Ճառագայթման լավավորման միջոցով ցույց է տրված նյութի հատկությունների կարգավորման բարելավման հնարավորությունը: Կատարված է էլեկտրաֆիզիկական պարամետրերի վրա ճառագայթման ազդեցության վիճակագրական գնահատում:

THE DISTRIBUTION OF ELECTROPHYSICAL PARAMETERS OF LARGE DIAMETER SINGLE CRYSTALS, IRRADIATED WITH DIFFERENT DOSES OF FAST NEUTRONS

G. G. MANUKYAN, R. M. ABRAMYAN

The investigation of radial inhomogeneity of electrophysical parameters of irradiated *Si* single crystals have been carried out. The possibility of the control and improvement of the properties by the dosage of the irradiation was shown. The statistical estimate of irradiation influence on electrophysical parameters have been made.