

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРА РАССЕЯНИЯ НА ВРЕМЯ ЖИЗНИ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ ГАФНИЕМ

В. С. Гарнык

Институт металлургии им. А. А. Байкова Российской академии наук, 117911, Москва, Россия

(Получена 20 апреля 1993 г. Принята к печати 12 июля 1993 г.)

В работе изучено влияние облучения быстрыми электронами с энергией 8 МэВ на время жизни и холловскую подвижность дырок в монокристаллах кремния марки КДБ-12, легированном гафнием до концентрации 10^{14} см $^{-3}$. Установлено, что время жизни, значительно снизившееся в результате воздействия облучения в интервале доз $3.2 \cdot 10^{14}$ — $6.4 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, после выдержки облученных образцов при комнатной температуре в течение 30 месяцев восстанавливалось, достигая уровня, наблюдавшегося в необлученных образцах. Анализ полученных результатов позволил сделать вывод о том, что устойчивость к воздействию облучения времени жизни определяется преобладанием механизма рассеяния носителей заряда на локальных центрах.

В работе [1] показано, что можно незначительно повысить радиационную стойкость по удельному сопротивлению монокристаллов кремния, легируя слитки в процессе выращивания гафнием. В настоящей работе изучено влияние облучения быстрыми электронами на холловскую подвижность и время жизни неосновных носителей заряда в монокристаллах кремния, содержащих гафний. Для экспериментов использовались кристаллы марки КДБ-12, легированные в процессе выращивания по Чохральскому гафнием до концентрации 10^{14} см $^{-3}$. Слитки, из которых вырезались образцы, были бездислокационные, выращенные в направлении $\langle 100 \rangle$, диаметром 70 мм. Содержание кислорода в исследованных кристаллах не превышало $1.1 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$. Примесь, определявшей тип проводимости, был бор. Время жизни неосновных носителей заряда измерялось на образцах, представлявших собой параллелепипеды размером $3 \times 3 \times 20$ мм 3 . Образцы, предназначенные для измерения ЭДС Холла, имели размеры $10 \times 3 \times 1$ мм 3 . Наибольшие ребра образцов обоих типов совпадали с направлением выращивания кристаллов. Для измерения времени жизни использовался фазовый метод [2] (относительная ошибка 30%), для измерения ЭДС Холла — стандартная методика с использованием постоянного магнитного поля и переменного тока (ошибка 20%). В таблице приведены результаты значений исходных (наблюдавшихся до облучения) параметров исследованных и контрольных образцов. Контрольные образцы вырезались из слитка той же марки КДБ-12, сходного по своим исходным параметрам исследованному, но нелегированному гафнием. Исследованные и контрольные образцы облучались импульсным потоком быстрых электронов с энергией 8 МэВ. Во время облучения образцы помещались в охлаждаемую водой и обдуваемую сжатым воздухом кассету. Относительно потока электронов образцы устанавливались таким образом, чтобы облучалась их наибольшая грань. Плотность потока электронов во всех экспериментах была $6.4 \cdot 10^{12}$ см $^{-2}$ с $^{-1}$. Поскольку величины дрейфовой и холловской подвижностей равны с точностью до константы, при

Образец	Параметр					
	ρ , Ом · см	τ , мкс	p , см ⁻³		μp , см ² /В · с	
			300 К	77 К	300 К	77 К
КДБ-12	14	138	$1.5 \cdot 10^{15}$	$1.2 \cdot 10^{15}$	430	1685
КДБ-12 (НФ)	16	102	$3.6 \cdot 10^{15}$	$2.2 \cdot 10^{15}$	156	478

обсуждении полученных результатов предполагалось, что характер дозовых зависимостей дрейфовой и холловской подвижностей одинаков.

Измерения, проведенные непосредственно после облучения, позволили установить, что как в контрольных образцах, так и в образцах, содержащих гафний, характер изменения холловской подвижности и времени жизни неосновных носителей заряда под воздействием облучения был подобен аналогичным зависимостям, наблюдаемым в многочисленных исследованиях, посвященных изучению радиационных свойств полупроводников. Выдержка облученных образцов при комнатной температуре в течение 30 месяцев привела к тому, что величина времени жизни в образцах, содержащих гафний, восстанавливалась до уровня, наблюдавшегося в необлученных кристаллах (рис. 1). В то же время в контрольных образцах подобного восстановления значения времени жизни не наблюдалось, лишь в образцах, облученных дозами свыше $4 \cdot 10^{15}$ см⁻², время жизни достигало уровня 50—60% от величины, характерной для исходных необлученных кристаллов. Удельное сопротивление и холловская подвижность в исследованных образцах в течение всего времени выдержки практически не менялись, оставаясь на уровне, наблюдавшемся сразу после облучения. Восстановление времени жизни неосновных носителей заряда в процессе длительной выдержки при комнатной температуре может быть вызвано перестройкой введенных в кристаллы при облучении активных центров, приводящей к уменьшению их рекомбинационных способностей. В кристаллах, содержащих гафний, этот процесс протекал быстрее. Если считать, что характер рассеяния при облучении и последующей выдержке при комнатной температуре не меняется, то причина наблюдаемых отличий, по-видимому, в следующем.

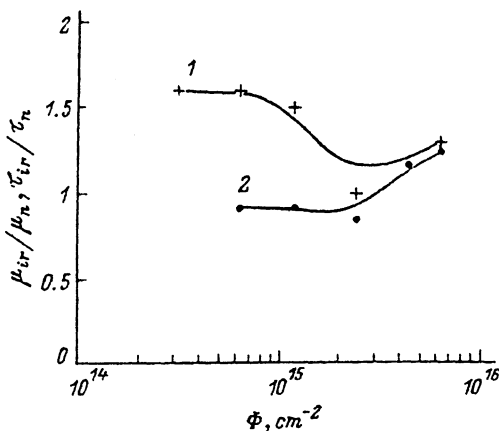


Рис. 1. Изменение холловской подвижности (1) и времени жизни неосновных носителей заряда (2) в зависимости от дозы облучения. Измерения проведены через 30 месяцев выдержки при комнатной температуре после облучения.

Предположим, что в результате возбуждения в полупроводнике p -типа проводимости возникло избыточное количество электронов, экспериментально определенное время жизни которых равно τ_n и такое же количество неравновесных дырок, нейтрализующих электрический заряд неравновесных электронов и характеризуемых временем жизни $\tau_p = \tau_n$. Будем считать, что рекомбинация неравновесных носителей заряда идет через локальные однозарядные центры, а распределение неравновесных электронов и дырок по энергиям такое же, как равновесных. Используя предлагаемые теорией полупроводников [3] соотношения

$$\Delta\sigma = e \Delta p \mu_p; \quad \Delta p = g \tau_p; \quad \mu_p = \frac{e \tau^*(E_p)}{m^*}, \quad (1)$$

где $\Delta\sigma$ — обусловленное фотоэффектом приращение дырочной проводимости (при хорошо воспроизводимых условиях эксперимента величина постоянная), Δp — избыточное по отношению к равновесному количество дырок, g — число избыточных дырок, возникающих в единице объема в единицу времени, τ_p — время жизни неравновесных дырок, $\tau^*(E_p)$ — зависимость от энергии времени релаксации дырок, m^* — эффективная масса дырок, e — заряд электронов, легко найти формулу, описывающую взаимосвязь времени жизни с временем релаксации:

$$\tau_p = \frac{\Delta\sigma m^*}{e^2 g \tau^*(E_p)}. \quad (2)$$

Согласно теории полупроводников [3], при условии параболического изотропного закона дисперсии характер зависимости величины времени релаксации носителей заряда от энергии определяется характером рассеяния. При рассеянии на тепловых колебаниях решетки: $\tau^*(E_p) = \tau_0 E_p^{-1/2} / kT$, при рассеянии на ионах: $\tau^*(E_p) = \tau_0 E_p^{3/2}$ и при рассеянии на нейтральных центрах: $\tau^*(E_p) = \tau_0 E_p^0$. τ_0 — константа в первом приближении от энергии носителей заряда не зависящая. Очевидно, что значение энергии дырок для случая рассеяния на тепловых колебаниях решетки в выражении (2) стоит в числителе, а при рассеянии на ионах в знаменателе. На рис. 2 показаны кривые, построенные без учета

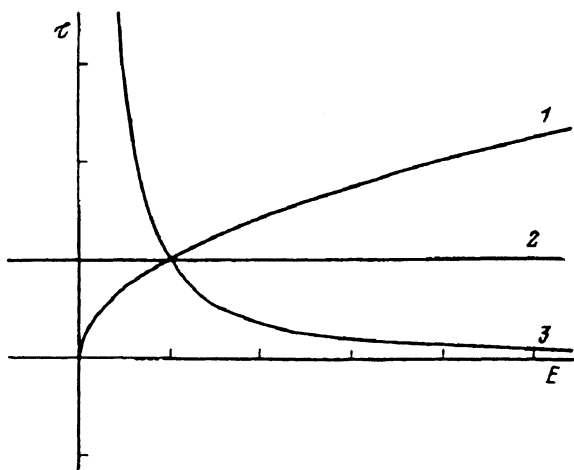


Рис. 2. Расчетные зависимости времени жизни неосновных носителей заряда от энергии носителей. 1 — рассеяние на тепловых колебаниях решетки, 2 — рассеяние на нейтральных центрах, 3 — рассеяние на ионах.

значения констант, входящих в формулу (2), и характеризующие зависимость времени жизни от энергии носителей заряда для всех трех случаев. При рассеянии на колебаниях решетки (кривая 1) низкой энергии соответствует малое время жизни, а при рассеянии на ионах — наоборот (кривая 3). С другой стороны, рекомбинация через локальные центры возможна лишь при условии

$$E_p \geq E_v - E_t, \quad (3)$$

где E_v — потолок валентной зоны и E_t — положение энергетического уровня центра рекомбинации в запрещенной зоне. В противном случае процесс рекомбинации будет маловероятен, т. е. малое время жизни соответствует выполнению, а высокое — невыполнению условия (3). Следовательно, при рассеянии на ионах характер зависимости времени жизни от энергии носителей заряда соответствует условию (3), а при рассеянии на тепловых колебаниях решетки — противоречит.

Приведенные в таблице результаты по величине подвижности носителей заряда, измеренной при 77 и 300 К, свидетельствуют о том, что в кристаллах, содержащих гафний, относительное изменение подвижности при понижении температуры меньше, чем в кристаллах без гафния. Этот факт дает основание предполагать, что в кристаллах, содержащих гафний, значительную роль играет рассеяние носителей заряда на локальных центрах, нейтральных или заряженных. Как было показано выше, такой характер рассеяния способствует сохранению высокого времени жизни неосновных носителей заряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] S. E. Mauger. Патент США, № 3, 1963. № 3444100, кл. 252—520.
- [2] Л. П. Павлов. Методы измерения параметров полупроводниковых материалов. М.: Высшая школа (1987).
- [3] П. С. Киреев. Физика полупроводников. М.: Высшая школа (1969).

Редактор В. В. Чалдышев
