

РЕКОМБИНАЦИЯ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ОБЛУЧЕННОМ КРЕМНИИ, ЛЕГИРОВАННОМ ПРИМЕСЯМИ ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛОВ

Л.А. Казакевич, П.Ф. Лугаков

Учреждение образования "Белорусский государственный аграрный технический университет", 220023, Беларусь, Минск, Скорины 99, тел. 264-62-41

Изучены особенности рекомбинации неравновесных носителей заряда на радиационных дефектах в полученном по методу Чохральского p -кремнии ($\rho = 3-20$ Ом.см), легированном одной из примесей переходных металлов IV группы таблицы Менделеева (титан, цирконий, гафний). Экспериментальные результаты получены из анализа температурных и инжекционных зависимостей времени жизни носителей заряда. Показано, что наличие в решетке кремния этих примесей приводит к изменению эффективности введения при облучении γ -квантами ^{60}Co рекомбинационно активных радиационных дефектов. Результаты объясняются с учетом влияния полей упругих напряжений, создаваемых скоплениями атомов переходных металлов, на пространственное распределение по кристаллу фоновых примесей кислорода и углерода и миграцию подвижных радиационных дефектов при облучении.

Введение

Примеси переходных металлов в легированном ими кремнии имеют тенденцию к образованию мелких групп [1], а при их концентрации от $1 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$ до предела растворимости $(3.3 \dots 5.6) \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$ происходит формирование их скоплений (примесных кластеров), что оказывает существенное влияние на процессы радиационного дефектообразования, так как присутствие структурных нарушений (дислокации, границы раздела, примесно-дефектные скопления), создающих в кристаллической решетке поля упругих напряжений, приводит обычно к ряду особенностей в накоплении и отжиге радиационных дефектов (РД) [2-3]. Целью данной работы было исследование процессов накопления рекомбинационно активных центров при облучении кремния, содержащего примеси переходных металлов (титан, цирконий, гафний).

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Эксперименты выполнялись на p -Si, полученном по методу Чохральского, с содержанием бора $N_B \sim (1-7) \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$. При выращивании кристаллы дополнительно легировались до концентраций $\sim 1 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$ титаном (Si:B,Ti), цирконием (Si:B,Zr) или гафнием (Si:B,Hf). В качестве контрольных использовались легированные только бором образцы кремния (Si:B) с близкими значениями удельного сопротивления. Концентрация фоновых примесей кислорода и углерода в этих материалах составляла соответственно $(6-9) \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$ и $< 1 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$. На различных этапах облучения γ -квантами ^{60}Co (температура облучения $T_{\text{обл}} \leq 50$ °C) измерялись инжекционные ($\Delta\rho/\rho_0 = 5 \cdot 10^{-4} - 3 \cdot 10^{-2}$) и температурные ($T_{\text{изм}} = 80-400$ К) зависимости времени жизни τ носителей заряда (стационарная фотопроводимость, фотомагнитозлектрический эффект, модуляция проводимости в точечном контакте). Дополнительно выполнялись также холловские измерения. Из этих данных при $T_{\text{изм}} = 300$ К рассчитывались коэффициенты $K_r = \Delta\tau / (\tau_0 - \tau_0^0) / \Phi$ радиационного изменения времени жизни носителей заряда (τ_0 , τ_0^0 - время жизни носителей заряда до и после облучения интегральным потоком Φ). Следует отметить, что величина K_r , как известно [4], пропорциональна концентрации образующихся при об-

лучении рекомбинационных центров и зависит от пространственного распределения РД (равномерно распределенные по объему кристалла или локализованные в скоплениях, окруженных потенциальным барьером для носителей заряда).

Определенные на участках линейного изменения $\Delta\tau^{-1}$ от Φ коэффициенты K_r приведены в таблице. Как видно, в исследуемых и контрольных кристаллах наблюдаются довольно сильная зависимость коэффициента радиационного изменения τ от удельного сопротивления (от концентрации бора). Анализ дозовых и температурных зависимостей τ , а также выполненные эксперименты по отжигу облученных кристаллов позволяют сделать заключение, что основными рекомбинационно активными РД являются боросодержащие комплексы. Вытесненный из узлов бор при используемых режимах облучения практически полностью уходит на образование комплексов междоузельный бор - междоузельный кислород (B_iO_i) с акцепторным энергетическим уровнем $E_c - 0.26$ эВ.

Таблица
Коэффициенты радиационного изменения
времени жизни носителей заряда

Материал	ρ , Ом.см	$N_B \cdot 10^{15}$, см $^{-3}$	$K_r \cdot 10^{12}$, см 2 с $^{-1}$
Si:B,Ti	18,0	1,2	1,0
Si:B	20,5	1,0	1,3
Si:B,Ti	4,5	4,5	2,4
Si:B	5,0	3,9	3,5
Si:B,Zr	14,0	1,5	2,5
Si:B	14,0	1,5	1,8
Si:B,Hf	7,0	2,8	4,0
Si:B	6,5	3,0	3,1
Si:B,Hf	3,3	6,5	6,0
Si:B	3,0	7,0	5,0

Важно отметить, что, как следует из результатов исследований, величина коэффициента радиационного изменения τ практически не зависит от содержания титана, гафния или циркония при изменении их концентрации от $1 \cdot 10^{10}$ до $3 \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$. Но при этом наличие атомов переходных

металлов в кристаллах сказывается на величине K_r , а тем самым и эффективности образования комплексов B_iO_i . Причем с уменьшением атомного номера (радиуса r [5]) легирующего элемента ($r_{Hf} > r_{Zr} > r_{Ti}$) имеет место уменьшение K_r .

В облученных кристаллах p -типа, содержащих высокую плотность введенных пластической деформацией дислокации ($N_D > 1 \cdot 10^6 \text{ см}^{-2}$), с ростом уровня инжекции $\Delta p/p_0$ носителей заряда наблюдалось увеличение K_r [6]. Объяснялся этот экспериментальный результат с учетом того, что при наличии дислокации возникают потенциальные барьеры Ψ для основных и ямы для неосновных носителей заряда, в силу чего неравновесные электроны и дырки оказываются пространственно разделены, и скорость их рекомбинации на созданных облучением центрах, локализованных в примесно-дефектной атмосфере дислокации, достаточно мала. При увеличении $\Delta p/p_0$ происходит снижение Ψ и возрастает скорость рекомбинации носителей заряда, а также величина K_r . Аналогичный характер инжекционных зависимостей K_r имеет место и в p -кремнии, легированном примесями переходных металлов. Можно предположить, что здесь потенциальные барьеры создаются скоплениями заряженных комплексов междоузельный углерод-междоузельный кислород (C_iO_i), являющимися основными компенсирующими РД [7], а рекомбинация носителей заряда осуществляется через акцепторный уровень комплексов B_iO_i . С уменьшением радиуса примесей переходных металлов увеличивается, как показывают результаты холловских измерений, скорость образования комплексов C_iO_i , что приводит к возрастанию плотности заряда и высоты барьера Ψ . По этой причине зависимость K_r от $\Delta p/p_0$ в $SiKb, Hf$ должна быть более слабой, чем в $SiKb, Zr$ (или $SiKb, Ti$), что действительно наблюдается на опыте.

Скопления электрически и рекомбинационно активных РД образуются, по нашему мнению, вблизи кластеров примесей переходных металлов, создающих в кристаллической решетке поля упругих напряжений, величина которых определяется атомным радиусом примеси. Подобно тому, как это имеет место в кристаллах, легированных редкоземельными элементами [8], у кластеров титана, циркония и гафния под воздействием их полей упругих напряжений при выращивании может формироваться атмосфера, состоящая из фоновых примесей кислорода и углерода. В процессе облучения к примесным кластерам мигрируют подвижные РД, в частности, вытесненные из узлов междоузельные атомы бора и углерода. Здесь они взаимодействуют с

атомами кислорода с образованием комплексов C_iO_i и B_iO_i , в результате чего примесная атмосфера кластеров перестраивается в примесно-дефектную. С ростом атомного номера примесей переходных металлов увеличиваются напряжения, создаваемые кластерами, а атмосфера становится более насыщенной углеродом, который диффундирует в деформированную область кристалла, что приводит к компенсации возникших там напряжений и уменьшению доли растворенного углерода в матрице кристалла. Из-за этого при облучении возрастает эффективность взаимодействия собственных междоузельных атомов с бором, что в итоге и приводит к наблюдаемому на опыте увеличению эффективности образования рекомбинационно активных комплексов B_iO_i , а тем самым и величины K_r .

Заключение

Таким образом, полученные результаты и их анализ позволяют сделать заключение, что образующиеся при облучении рекомбинационно и электрически активные комплексы накапливаются преимущественно вблизи кластеров примесей титана, циркония или гафния, формируя их примесно-дефектную атмосферу. При этом степень радиационного изменения времени жизни носителей заряда зависит от атомного радиуса примеси, что обусловлено пространственным перераспределением фоновых примесей и подвижных РД из-за изменения величины полей упругих напряжений, создаваемых кластерами переходных металлов.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований.

Список литературы

1. Баграев Н.Т., Власенко Л.С., Карпов Ю.А., Ковалева Т.А. // Сб. тез. докл. VI конф. по процессам роста и синтеза полупроводниковых кристаллов и пленок. - Новосибирск: 1982. - Т. 2. - С. 181.
2. Казакевич Л.А., Лугаков П.Ф. // ФТП. - 1980. - Т. 14. - С. 124.
3. Герасименко Н.И., Мордкович В.Н. // Поверхность. - 1987. - № 6. - С. 5.
4. Вавилов В.С. Действие излучений на полупроводники. - М.: Наука, 1963. - 264 с.
5. Вайнштейн Б.К., Фридкин В.М., Инденбом В.Л. Современная кристаллография. Т. 2. Структура кристаллов. - М.: Наука, 1979. - 328 с.
6. Kazakevich L.A., Lugakov P.F., Filippov I.M. // Phys. St. Sol. (a). - 1987. - V. 113. - P. 307.
7. Asom M.T., Benton J.L., Sauer R., Kimerling L.C. // Appl. Phys. Lett. - 1987. - V. 51. - P. 256.
8. Неймаш В.Б., Соснин М.Г., Шаховцов В.И., Шиндич В.Л. // ФТП. - 1981. - Т. 15. - С. 786.

RECOMBINATION OF CHARGE CARRIERS IN IRRADIATED SILICON DOPED BY TRANSITION METALS IMPURITIES

L.A. Kazakevich, P.F. Lugakov

Belarussian State Agrarian Technical University, 220023, Minsk, Skorina ave. 99, tel. 264-62-41

It has been studied the peculiarities of recombination of nonequilibrium charge carriers on radiation-induced defects in received according to Chohralsky method p -silicon ($p \approx 3-20 \Omega \cdot \text{cm}$) doped by one of the impurities of transition metals of the IVth group of Mendeleev table (titanium, circonium, hafnium). Experimental results are obtained out of the analyses of temperature and injection dependences of the life time of charge carriers. It has been shown that the availability of these impurities in silicon grate changes the effectiveness of formation during the irradiation by ^{60}Co γ -quantum of recombinationally active radiation-induced defects. The results are explained taking into consideration the influences of elastic stress fields created by the aggregates of transition metals atoms on space distribution over the crystal of oxygen and carbon background impurities as well as on the migration of movable radiation-induced defects during irradiation.