

06;10

Особенности изменения электрических параметров кремниевых $p-n$ -структур, облученных электронами при высоких температурах

© А.М. Мусаев

Институт физики Дагестанского научного центра РАН, Махачкала
E-mail: akhmed-musaev@yandex.ru

Поступило в Редакцию 29 мая 2012 г.

Исследовано влияние температурного режима электронного облучения с энергией 4 MeV на изменение основных электрофизических характеристик диффузионных кремниевых p^+-n-n^+ -структур. Показано, что температура кристалла и интегральная интенсивность при облучении существенно влияют на параметры образования радиационных дефектов и на характер их распределения в различных областях кремниевых p^+-n-n^+ -структур.

Введение в активные области приборов радиационных дефектов (РД), дающих глубокие рекомбинационные уровни, позволяет повысить быстродействие $p-n$ -структур, но одновременно это приводит к некоторому ухудшению других параметров структур, так как однородное распределение концентрации рекомбинационных центров по всей $p-n$ -структуре не является оптимальным и приводит к увеличению статического прямого падения напряжения, а также к увеличению обратного тока. Наиболее эффективным является метод профильного формирования РД в кремниевых $p-n$ -структурах, которые позволяют локально уменьшить времена жизни неравновесных носителей заряда в структурах. Оптимальное соотношение между параметрами обратного восстановления и потерями в проводящем состоянии обеспечивает условие, при котором пик локальной концентрации РД расположен в n -базе структуры вблизи области пространственного заряда (ОПЗ). Данная задача реализуется введением РД посредством ионного облучения с варьированием характеристик. Однако данные методы локального формирования РД в $p-n$ -структурах нельзя использовать при массовом производстве полупроводниковых приборов, поэтому облучение элек-

тронами с энергией в единицы MeV в настоящее время является одним из основных методов регулирования времени жизни неравновесных носителей заряда в кремниевых полупроводниковых приборах.

Эффективность введения вторичных радиационных дефектов при электронном облучении зависит от концентрации и зарядового состояния вступающих в квазихимическую реакцию первичных радиационных дефектов и примесных атомов. В свою очередь зарядовое состояние компонентов вторичных радиационных дефектов зависит от условий эксперимента. Существенными факторами, определяющими параметры глубоких рекомбинационных центров (РЦ) в запрещенной зоне кремния, являются температура $p-n$ -структур в процессе облучения, величина интегрального потока электронов, электрическое поле, которым определяются зарядовое состояние компонентов данных РЦ и состояние электронной подсистемы кристалла, которое оказывает существенное влияние на кинетику образования и перераспределения РД [1–3]. При высокотемпературном облучении $p-n$ -структур, вследствие диссоциации менее устойчивых РД, появляются более устойчивые РД, контролирующие темп рекомбинации неосновных носителей заряда. Основными РЦ в n -Si, которые оказывают влияние на вышеприведенные характеристики $p-n$ -структур, являются акцепторные уровни: А-центр с энергией $E_A = (E_c - 0.18 \text{ eV})$, а также дивакансия, которой соответствуют три энергетических уровня в запрещенной зоне кремния.

В данной работе исследовано влияние температуры и величины интегрального потока электронов на изменение основных электрофизических параметров кремниевых $p^+ - n - n^+$ -структур. Проведен анализ механизмов, приводящих к изменению параметров данных структур под воздействием вышеприведенных факторов.

Исследования проводились на диффузионных $p^+ - n - n^+$ -структурах, изготовленных на базе n -Si(P) с удельным сопротивлением $\rho = 40 \text{ } \Omega/\text{cm}$. Структуры изготавливались по диффузионной технологии с применением в качестве диффузантов бора и фосфора. Глубина залегания $p-n$ -перехода составляла $\sim 125 \text{ } \mu\text{m}$, толщина структуры $\sim 250 \text{ } \mu\text{m}$, площадь — $1.4 \times 1.4 \text{ mm}^2$. Отбор образцов для исследования производился по одинаковым характеристикам $p-n$ -структур, которые усреднялись по результатам измерения 10 образцов. Облучение проводилось на линейном импульсном ускорителе электронов при температурах образцов 20 и 250°C. Энергия облучающих электронов составляла 4 MeV. Интегральный поток электронов варьировался от $0.8 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$

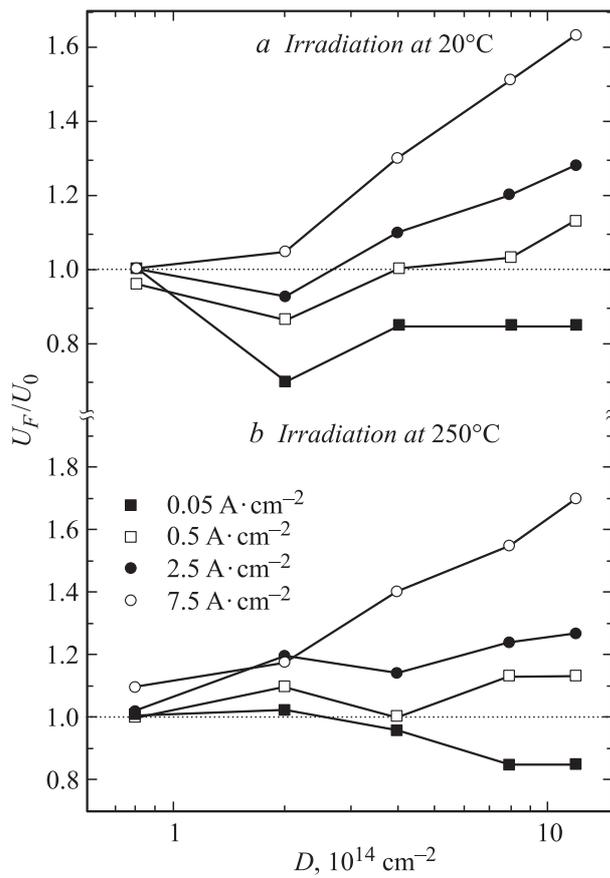


Рис. 1. Зависимость изменения относительного падения прямого напряжения на $p-n$ -структурах $U_F/U_0(D)$ (U_0, U_F — прямые напряжения до и после облучения) при различных значениях плотности прямых токов J_F в зависимости от интегрального потока электронов, облученных при температурах: a — 20°C и b — 250°C .

до $1.3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. После облучения структуры подвергались изотермическому отжигу при 300°C в течение 0.5 h, а потом при 200°C в течение 10 h. Измерение параметров $p-n$ -структур проводилось до и после облучения.

На рис. 1, *a, b* приведены зависимости $U_F/U_0(D)$ изменения относительного падения прямого напряжения на $p-n$ -структурах при различных значениях прямых токов в зависимости от интегрального потока электронов, облученных при температурах 20 и 250°С. Здесь U_0 , U_F — величина прямого напряжения на структуре до и после облучения.

Облучение при 20°С в диапазоне интегрального потока электронов $\sim (0.5 \div 1.3) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ приводит к уменьшению прямого падения напряжения. Возможными причинами данного эффекта являются расширение ОПЗ в процессе облучения и неоднородный профиль времени жизни неравновесных носителей заряда части базовой области структур, прилегающей к ОПЗ, которые могут привести к уменьшению напряженности тормозящего электрического поля структуры. Кроме того, к уменьшению прямого падения напряжения при небольших дозах облучения может привести и увеличение подвижности электронов в базовой области структуры. Как показано в работе [4], подвижность в n -Si при облучении может расти при введении акцепторных (отрицательно заряженных) центров вблизи атомов фосфора, которые „нейтрализуют“ положительно заряженные ионные центры.

Как видно из рис. 1, *b*, облучение при 250°С приводит к равномерному увеличению падения прямого напряжения с увеличением интегрального потока электронов.

Наблюдаемые различия в изменении прямого падения напряжения, при различных температурных режимах облучения, являются следствием того, что вольт-амперные характеристики $p-n$ -структур в зависимости от уровня инжекции определяются процессами, обусловленными изменениями скоростей объемной рекомбинации неравновесных носителей заряда в различных участках базовой области структуры.

На рис. 2, *a, b* приведены зависимости $C_F/C_0(D)$ изменений относительных величин барьерных емкостей облученных структур к необлученным от интегрального потока электронов, при приложенных обратных напряжениях $U = 0, 1, 5, 50 \text{ V}$, облученных при 20 и 250°С.

Поведение барьерной емкости $p-n$ -перехода во многом определяется параметрами глубоких уровней в базовой области структуры [5]. Уменьшение барьерных емкостей при введении РД связано с проявлением компенсации мелких доноров глубокими акцепторами. Как видно из результатов измерений, зависимости $C_F/C_0(D)$ имеют

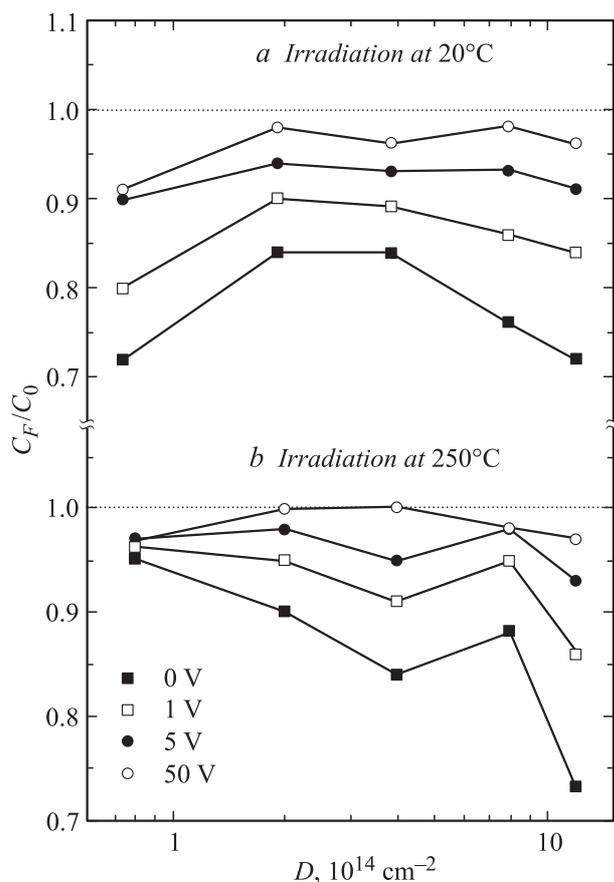


Рис. 2. Зависимость изменения относительных значений барьерных емкостей облученных структур к необлученным $C_F/C_0(D)$ от интегрального потока электронов при различных приложенных обратных напряжениях U , облученных при: *a* — 20°C и *b* — 250°C.

неоднозначный характер. При 20°C сечение захвата вакансии атомом фосфора в *n*-Si вследствие кулоновского притяжения примерно в 20 раз больше сечения ее захвата электрически неактивным межузельным кислородом [6]. Поэтому в *n*-Si при 20°C скорость образования

E-центров превышает скорость образования *A*-центров. После удаления *E*-центров посредством отжига структур в базовой области структуры, прилегающей к ОПЗ, остается небольшая концентрация *A*-центров. Из вышеприведенного следует, что существенное расширение ОПЗ при облучении электронами при 20°C в основном определяется образованием акцепторных *A* и *E*-центров. Увеличение ОПЗ приводит к ограничению дальнейшего накопления РЦ в ОПЗ. Это связано с тем, что, когда генерация пар Френкеля при облучении происходит в слое ОПЗ, где свободные электроны отсутствуют, данные первичные вакансии в основном остаются электрически нейтральными и не участвуют в образовании вторичных радиационных дефектов. При больших интегральных дозах облучения, когда все примесные атомы оказываются связанными в комплексы, доминирующим дефектом может оказаться образование дивакансии $-V_2$.

Анализ зависимостей в виде $(S/C)^2$ и $(S/C)^3$, где S — площадь, C — емкость структуры, от приложенного обратного напряжения для структур, облученных при 250°C, показывает, что они имеют нелинейный характер, что может быть связано с присутствием в области пространственного заряда нескольких типов РЦ с различными концентрациями, а также с распределением их в базовой области структур с некоторым градиентом.

Исходя из вышеприведенного, можно предположить, что уменьшение значения $C_F/C_0(D)$ при больших дозах облучения (когда $D > 8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$) связано с образованием акцепторных комплексов дивакансий (V_2), которые стабильны до температур $-400 \div 500^\circ\text{C}$ [7].

На рис. 3 приведены зависимости $-\tau_F/\tau_0(D)$ изменения относительных величин времени восстановления обратного сопротивления структур от интегрального потока электронов, облученных при температурах 20 и 250°C. При $D \approx 1.1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ на зависимостях наблюдается излом, который указывает на уменьшение эффективности введения РЦ и достижения некоторой стационарной концентрации дефектов, которые приводят к стабилизации величины данного параметра структур.

На вставке рис. 3 показаны осциллограммы процесса обратного восстановления сопротивления структур. Как видно из осциллограмм, изменениям времени обратных восстановлений подвергается только первая фаза обратного восстановления.

Из результатов исследований следует, что зависимости времен восстановления обратных сопротивлений структур от интегрального

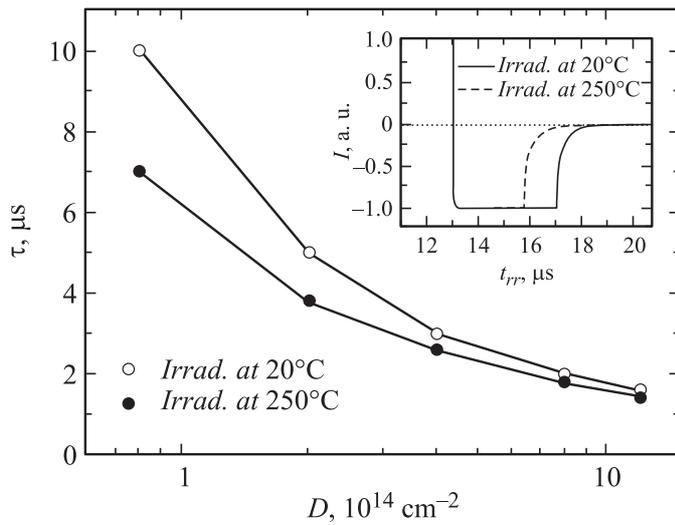


Рис. 3. Зависимость изменения относительных величин времени обратного восстановления сопротивления структур — $\tau_r/\tau_0(D)$ от интегрального потока электронов, облученных при температуре 20 и 250°C. На вставке осциллограммы процесса обратного восстановления сопротивления структур, облученных при температурах 20 и 250°C и интегральном потоке электронов, равном $D = 1.1 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$.

потока электронов, облученных при температурах 20 и 250°C, существенно отличаются, хотя концентрации вводимых рекомбинационных А-центров в базовых областях структур имеют примерно одинаковые величины.

Исходя из этого следует, что при высокотемпературном облучении ширина ОПЗ и распределение концентрации введенных рекомбинационных центров в области структуры, прилегающей к ОПЗ, имеют существенно иные параметры, чем в структурах, облученных при 20°C.

Таким образом, электрифизические характеристики кремниевых $p^+ - n - n^+$ -структур сложным образом зависят от дозы и температуры электронного облучения, которые определяются в основном характером распределения концентраций РЦ в различных областях кремниевых структур.

Список литературы

- [1] *Кориунов Ф.П., Гатальский Г.В., Иванов Г.М.* // Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. Минск: Наука и техника, 1978.
- [2] *Пагава Т.А.* // ФТП. 2002. Т. 36. В. 10. С. 1159–1162.
- [3] *Hazdra P., Vobecky J., Dorschner H., Brand K.* // Microelectronics J. 2004. V. 35. P. 249–257.
- [4] *Видалко Е.Н., Гайдар Г.П., Гирий В.А.* // Неорганические материалы. 1986. Т. 22. № 4. С. 533–535.
- [5] *Берман Л.С., Лебедев А.А.* // Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Л.: Наука, 1981. 176 с.
- [6] *Козлов В.А., Козловский В.В.* // ФТП. 2001. Т. 35. В. 7. С. 769–794.
- [7] *Пагава Т.А.* // ФТП. 2006. Т. 40. В. 8. С. 919–921.