

УДК 621.382.2

СРАВНЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ГАММА (Co^{60}) И ЭЛЕКТРОННОГО ($E=4-25$ МэВ) ОБЛУЧЕНИЯ В РАДИАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ КРЕМНИЕВЫХ ДИОДНЫХ СТРУКТУР

Ф.П. КОРШУНОВ, И.Г. МАРЧЕНКО, В.И. КУЛЬГАЧЕВ, Н.Е. ЖДАНОВИЧ, П.М. ГУРИН

*Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению
П. Бровка, 19, Минск, 220072, Беларусь*

Поступила в редакцию 1 марта 2010

Приведены результаты сравнения воздействия гамма (Co^{60}) и электронного ($E=4-25$ МэВ) облучения и отжига в интервале температур $20-300^{\circ}C$ на соотношения статических и динамических характеристик силовых приборных структур. Установлено, что для достижения наилучшего соотношения прямого падения напряжения и быстродействия силовых приборных структур целесообразно использовать высокоэнергетические электроны ($10-20$ МэВ) в том случае, если радиационная обработка проводится на финишном этапе изготовления приборов. Если же после радиационной обработки предполагается проведение технологических операций при температуре порядка $300^{\circ}C$ (а именно: посадка в корпуса и на термокомпенсатор), то в этом случае различия в использовании гамма- или электронного облучения не наблюдается. Показано, что наблюдаемое снижение прямого падения напряжения при одинаковых значениях быстродействия в диапазоне энергий $10-20$ МэВ в сравнении с облучением гамма-квантами и электронами с энергией <10 МэВ обусловлено повышенной концентрацией дивакансий.

Ключевые слова: радиационная технология, кремниевые диодные структуры, облучение, радиационные дефекты, время жизни неосновных носителей заряда.

Введение

Несмотря на то, что в последнее время все больший интерес проявляется к получению новых полупроводниковых материалов и исследованию их свойств с целью создания на их основе приборов с улучшенными характеристиками, кремний остается основным материалом, используемым для производства элементной базы для силовых полупроводниковых приборов (СПП). На его основе изготавливается более 95% изделий полупроводниковой электроники.

Это обусловлено тем, что, в отличие от других материалов, производство кремния отличается относительной дешевизной, в то время как производство других, более перспективных материалов (арсенид галлия, карбид кремния), освоено не в такой степени, чтобы сделать приборы на их основе достаточно дешевыми для массового производства и широкомасштабного использования в электронике и электротехнике.

По-прежнему востребованы кремниевые биполярные приборы (транзисторы, силовые диоды, тиристоры, симисторы и др.). Они составляют основу преобразовательного оборудования, применяемого в энергетике, машиностроении, военной и бытовой технике, на транспорте и др. и оказывают решающее влияние на эффективность всей преобразовательной системы.

Более качественное преобразование электроэнергии при минимальных потерях требует использования более совершенных СПП с оптимальным соотношением функциональных параметров. Для их создания не потеряли актуальность методы, связанные с использованием высокоэнергетических излучений (гамма-кванты, электроны) в отдельности или совместно с последующей термообработкой.

Эти методы предполагают введение в активные области приборных структур вместо золота или платины эффективных радиационных центров рекомбинации, обеспечивающих требуемый уровень быстродействия [1–8]. В связи с этим представляет интерес проведение исследований с целью изучения различных методов увеличения быстродействия диодных структур с использованием радиационной обработки для определения возможностей как в плане получения оптимального соотношения статических и динамических характеристик приборов (минимальное прямое падение напряжения и максимальное быстродействие), так и эффективности их применения в технологических процессах в промышленности.

Экспериментальная часть

В данной работе приводятся результаты исследования влияния радиационных дефектов (РД) образующихся в кремниевых p - n -структурах при электронном (4–25 МэВ) и гамма (Co^{60}) облучении и последующем отжиге на статические (прямое падение напряжения U_F) и динамические (определяется время жизни ННЗ τ_p) характеристики таких структур. В качестве объектов исследования использовались p - n -структуры силовых диодов, изготовленные по стандартной диффузионной технологии на тянутом кремнии с удельным сопротивлением $\rho=32$ Ом·см, с толщиной p -эмиттера 40 мкм и n -базы 180 мкм. Радиационное воздействие осуществлялось посредством облучения электронами с энергией 4–25 МэВ на линейных ускорителях электронов ЭЛУ-4, Электроника 006 и ЛУЭ-25 соответственно и гамма-квантами от изотопа Co^{60} в установке "Исследователь". Отжиг облученных структур проводился в печи на воздухе. В ходе исследований измерялись DLTS-спектры [9], регистрировалось измеряемое в импульсном режиме значение прямого падения напряжения U_F и время жизни ННЗ τ_p в высокоомной базе структур при высоком уровне инжекции [10].

На первом этапе было выполнено определение термической стойкости дефектов, образующихся при облучении гамма-квантами и электронами разных энергий. Для этого облученные образцы (были подобраны образцы с одинаковым временем жизни после облучения равным 1,5 мкс, что соответствовало оптимальному быстродействию при сохранении прямого падения напряжения на приборах в пределах норм технических условий) отжигались изохронно в интервале температур 20–400°C с шагом 20°C, и после каждого отжига проводилось измерение τ_p и U_F . Основные результаты данных исследований приведены на рис. 1 в виде зависимости изменения времени жизни ННЗ, как доли неотожженных радиационных дефектов f_t ($f_t=(1/\tau_{pT}-1/\tau_{p0})/(1/\tau_{pФ}-1/\tau_{p0})$, где $\tau_{pФ}$ — время жизни ННЗ после облучения, τ_{pT} — время жизни ННЗ после отжига при определенной температуре, а τ_{p0} значение времени жизни ННЗ до облучения) от температуры отжига.

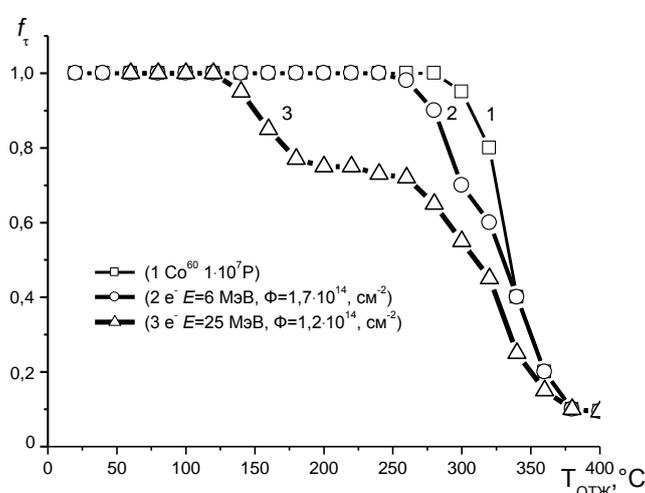


Рис. 1. Зависимости доли неотожженных дефектов f_t от температуры отжига

На рисунке представлены характерные данные для образцов, облученных гамма-квантами (кривая 1), электронами с энергией 6 МэВ (кривая 2) и 25 МэВ (кривая 3). Ход зави-

симостей $f_{\tau}(T_{\text{отж}})$ для других энергий электронов аналогичен зависимости для электронов с $E=6$ МэВ и они на графике не приводятся.

Как видно из рис. 1, на зависимости $f_{\tau}(T_{\text{отж}})$ для образцов облученных, гамма-квантами, наблюдается одна стадия отжига при температуре 300–350°C; для образцов, облученных электронами с энергией 4–20 МэВ (приведена зависимость для $E=6$ МэВ (кривая 2)) на зависимости наблюдаются две стадии отжига при температурах 280–300°C и 300–350°C, а для образцов, облученных электронами с энергией 25 МэВ (кривая 3) наблюдается три стадии отжига при температурах 140–180°C, 280–300°C и 300–350°C. Таким образом, приведенные результаты изохронного отжига указывают на различный состав дефектов, определяющих рекомбинацию в исследуемых структурах в зависимости от типа облучения.

На следующем этапе были проведены исследования с целью определения эффективности использования гамма и электронного облучения разной энергии для регулирования быстродействия приборов в плане обеспечения оптимального соотношения статических (U_F) и динамических (τ_p) параметров. Для этого нами были построены зависимости (рис. 2) прямого падения напряжения U_F от энергии электронов при постоянном значении времени жизни ННЗ τ_p (определяет быстродействие), равном минимальному значению, при котором значение U_F соответствует нормам ГУ (1,5 мкс для исследуемых структур). Построение таких зависимостей осуществлялось следующим образом. Для построения зависимости I (после облучения) проводилось облучение исследуемых структур электронами с энергиями 4, 6, 10, 15, 20, 25 МэВ в диапазоне доз $\Phi=5 \cdot 10^{13}$ – $5 \cdot 10^{14}$ см⁻² и гамма-квантами Co^{60} в диапазоне доз $D=2,6 \cdot 10^6$ – $1 \cdot 10^8$ Р (в результате взаимодействия гамма-квантов Co^{60} с кремнием образуются комптон-электроны с энергией $E=0,5$ МэВ). Затем из полученного набора образцов для каждой энергии отбирались структуры, у которых τ_p равнялось 1,5 мкс. У этих образцов измерялось значение U_F и строилась зависимость I . Затем часть облученных образцов отжигалась при температуре 150°C, а другая при температуре 300°C и из этих партий также, для каждой энергии, отбирались структуры, у которых τ_p после соответствующего отжига равнялось 1,5 мкс, для этих образцов также измерялось значение U_F и строились зависимости 2 и 3.

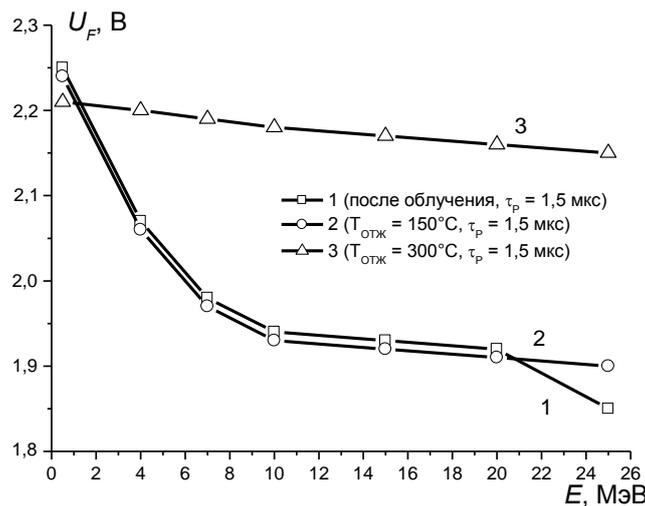


Рис. 2. Зависимости прямого падения напряжения U_F от энергии электронов. τ_p ННЗ в n -базе равно 1,5 мкс для всех энергий и температур отжига; $j_F=500\text{А/см}^2$

Как видно из рис. 2, на зависимости $U_F(E)$ после облучения (кривая 1) наблюдается уменьшение U_F при постоянном значении τ_p в интервале энергий 0,5–10 МэВ и 20–25 МэВ и отсутствие изменений на участке 10–20 МэВ. На зависимости, полученной после отжига при температуре 150°C (кривая 2), уменьшение U_F наблюдается только в интервале энергий 0,5–10 МэВ, а на зависимости, полученной после отжига при температуре 300°C (кривая 3), значение U_F остается практически неизменным во всем диапазоне энергий электронов.

Таким образом, самое высокое падение U_F при времени жизни неосновных носителей 1,5 мкс в диодных структурах имеет место при облучении их гамма-квантами (компон-электронами с энергией 0,5 МэВ), которое снижается по мере роста энергии электронов и самое низкое U_F наблюдается в диапазоне энергий электронов 10–25 МэВ. Это обусловлено структу-

рой уровней радиационных дефектов, вводимых в кремний электронами различных энергий, а также термостабильностью этих дефектов.

С целью интерпретации результатов, приведенных на рис. 1, 2, нами были проведены измерения DLTS-спектров исследуемых образцов после облучения электронами и гамма-квантами и после отжига при температурах, соответствующих стадиям отжига при 150°C и 300°C. Данные результаты приведены на рис. 3.

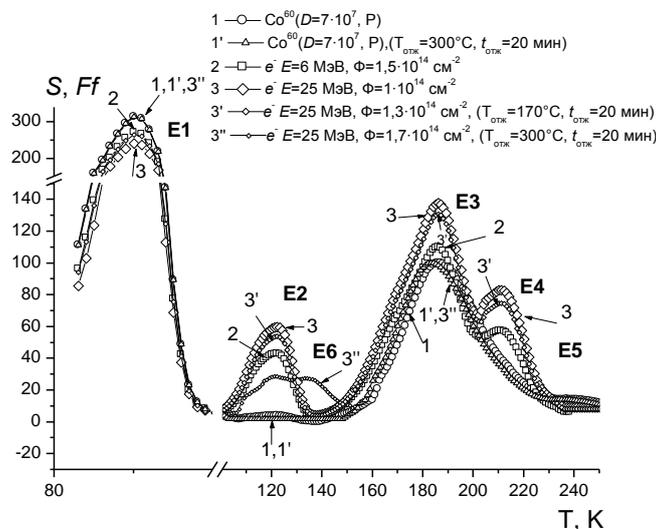


Рис. 3. DLTS-спектры образцов после облучения электронами и гамма-квантами и после отжига при температурах, соответствующих стадиям отжига при 150°C и 300°C

Как видно из рис. 3, в снятых после облучения и отжига спектрах (кривые 1–3, 1', 3', 3'') наблюдаются следующие уровни дефектов: E1 — $E_c-0,17$ эВ (суперпозиция А-центра и дефекта C_1-C_s [11] для всех кривых); E2 — $E_c-0,24$ эВ (дивакансия, кривые 2, 3, 3'); E3 — $E_c-0,35$ эВ (не идентифицированный дефект — на всех кривых); E4 — $E_c-0,42$ эВ (дивакансия кривых 2, 3, 3'). После отжига образцов, облученных электронами с энергией 25 МэВ при температуре 170°C (кривая 3'), наблюдается незначительное уменьшение амплитуды максимумов E2 и E4, что, по всей видимости, обусловлено отжигом тетравакансий [12], из которых состоит ядро кластеров, образующихся в результате облучения электронами с энергией 25 МэВ [7].

В спектре, полученном после отжига при температуре 300°C (кривая 3''), исчезают уровни E2 и E4 и образуется новый максимум E6, являющийся суперпозицией нескольких максимумов от нескольких уровней дефектов. Для других энергий электронов спектр уровней дефектов после отжига 300°C аналогичен спектру для $E=25$ МэВ. Все спектры приведены для образцов с одинаковым временем жизни, равным 1,5 мкс, поэтому образцы, которым соответствуют кривые 3' и 3'', полученные для подвергшихся отжигу образцов, были облучены большими дозами.

Сопоставление спектров и зависимостей, приведенных на рис. 1–3, позволяет сделать выводы, что наблюдаемое различие в ходе зависимостей $U_F(E)$ приборных структур при одинаковом значении времени жизни ННЗ после облучения и отжига в интервале энергий электронов 0,5–10 МэВ обусловлено различием в концентрации дефекта с уровнем $E_c-0,42$ эВ, принадлежащего дивакансии. Снижение U_F в диапазоне энергий 20–25 МэВ обусловлено скорее всего повышенной концентрацией дивакансий и более сложных дефектов, входящих в состав радиационных кластеров. Как было показано в [4], увеличение эффективности введения дивакансии с ростом энергии электронов обусловлено спецификой образования основных РД (А-центров и дивакансий), являющихся вторичными дефектами после образования в ходе облучения первичных и вакансий, и межузельных атомов. Смена доминирующего рекомбинационного уровня на более мелкий (дивакансии на А-центр) обуславливает смещение ВАХ в сторону более высоких значений прямого падения напряжения U_F в отожженных образцах при одинаковом значении времени жизни ННЗ. Это согласуется с результатами работы [13], где на примере сравнения

электронного облучения и легирования золотом и платиной показано, что оптимальное соотношение статических и динамических параметров получается для случая легирования золотом.

Заклучение

Таким образом, из полученных результатов можно сделать вывод о том, для достижения наилучшего соотношения характеристик проводимости и быстродействия силовых приборных структур целесообразно использовать высокоэнергетические электроны (10–20 МэВ) в том случае, если радиационная обработка проводится на финишном этапе изготовления приборов. Использовать электроны с энергией, превышающей 20 МэВ, не имеет смысла, поскольку выигрыш в снижении прямого падения напряжения незначительный, и он может исчезнуть в ходе эксплуатации прибора из-за разогрева приборной структуры. Если же после радиационной обработки предполагается проведение технологических операций при температуре порядка 300°C (а именно: посадка в корпуса и на термокомпенсатор), то в этом случае, как следует из представленных в данной работе результатов, различия в использовании гамма- или электронного облучения не наблюдается.

Данная работа выполнена при частичной финансовой поддержке Фонда фундаментальных исследований Республики Беларусь.

COMPARISON OF INFLUENCE OF GAMMA (Co^{60}) AND ELECTRON ($E=4-25$ MeV) IRRADIATION IN SILICON DIODE STRUCTURES RADIATION PROCESSING

F.P. KORSHUNOV, I.G. MARCHENKO, V.I. KULGACHEV, N.E. ZHDANOVICH, P.M. GURIN

Abstract

The results of comparison of influence of gamma (Co^{60}) and electron ($E=4-25$ MeV) irradiation and annealing in temperature range of 20-300°C on power devices static and dynamic characteristics trade-off are shown in this work. It is established that better power devices forward voltage drop and operation speed trade-off are achieved with irradiation of high energy electrons ($E=10-20$ MeV), in the case when radiation treatment should be performed on finished devices. If radiation treatment precedes technological operation at temperatures about 300°C (encasing), there are no differences between gamma and electron irradiation. It is shown that observed forward voltage decreasing at equal operation speed in energy range 10–25 MeV in comparison with gamma and electron <10 MeV irradiation are due to higher divacancy concentrations.

Литература

1. *Visniakov J., Marcinkevicius A.J.* // Electronics and electrical engineering. 2007. No. 4. P. 13–16.
2. *Siemieniec R., Niedernostheide F.-J., Schulze H.-J. et al.* // J. Electrochem. Soc. 2006. Vol. 153, N 2. P. G108–G118.
3. *Daliento S.; Sanseverino A.; Spirito P. et al.* // Proc. of The 12th Int. Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs. 2000. P. 283–285.
4. *Vobecky J., Hazdra P., Záhlava V.* // Microelectronics Reliability. 2004. Vol. 43. P. 537–544.
5. *Vobecky J., Hazdra P.* // Microelectronics Reliability. 2003. Vol. 43. P. 1883–1888.
6. *Вавилов В.С., Горин Б.М., Данилин Н.С. и др.* // Радиационные методы в твердотельной электронике. М., 1990.
7. *Коршунов Ф.П., Гатальский Г.Т., Иванов Г.М.* // Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах. Минск, 1978.
8. *Коршунов Ф.П.* // Вести АН СССР. 1982. № 11. С. 80–87.
9. *Берман Л.С., Лебедев А.А.* Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках Л., 1981.
10. *Lax B, Newstadter ST.* // J. Appl. Phys. 1984. Vol. 25. P. 1148–1154.
11. *Murin L.I.* // Phys. Stat. Sol. (a). 1986. Vol. 93, N 2. P. K147–149.
12. *Ермолов П., Карманов Д., Лефлат А., и др.* // ФТП. 2002. Т. 36, Вып. 10. С. 1194–1201.
13. *Baliga B.J., Sun E.* // IEEE Trans. ED 1977. Vol. ED-24. № 6. P. 685–688.