

Технологические особенности электронного облучения Si p⁺–n–n⁺-диодов при повышенных температурах

© И.Г. Марченко[¶], Н.Е. Жданович

Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
22072 Минск, Беларусь

(Получена 14 апреля 2011 г. Принята к печати 29 апреля 2011 г.)

Изучено поведение времени жизни неравновесных носителей заряда τ_p , обратного тока I_R и прямого падения напряжения U_F в электронно-облученных ($E_{ит} = 6$ МэВ) промышленных p⁺–n–n⁺-диодах при температурах облучения в интервале $T_{ит} = 20–400^\circ\text{C}$. Исследования проводились на образцах, изготовленных на монокристаллическом Si, легированном фосфором в процессе выращивания по Чохральскому (КЭФ) и с помощью ядерных реакций (КОФ). Показано, что путем выбора температурного режима технологического облучения, можно решить проблему достижения малых значений τ_p при минимальном росте U_F и I_R в быстродействующих диодах. Установлено, что при сопоставимых изменениях величины τ_p в базовом слое диодов, наилучшее соотношение U_F и I_R в образцах на КЭФ наблюдается при $T_{ит} = 300^\circ\text{C}$, а в образцах на КОФ — при $T_{ит} = 350^\circ\text{C}$.

1. Введение

Основной областью использования излучений высокой энергии в технологии силовых полупроводниковых приборов (СПП) ключевого типа: диодов, транзисторов и тиристоров является контролируемое уменьшение времени жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) в их полупроводниковых структурах. Новые разработки в радиационной технологии всегда представляют интерес, так как существует вероятность, что они позволят преодолеть некоторые из ограничений, связанных с существующими технологическими методами, и создать СПП более пригодные для практического применения. Современные исследования в этом направлении сосредоточены на достижении наилучшего сочетания частотных и статических характеристик приборов [1–8]. Дальнейшее их улучшение видится в поиске наиболее удачных решений при выборе условий радиационной обработки для конкретных типов приборных структур.

Известно [9–11], что образование глубоких радиационных центров (РЦ) в запрещенной зоне полупроводника, определяющих быстродействие, прямое падение напряжения и обратные токи в облученных полупроводниковых приборах, контролируется условиями облучения, среди которых наиболее существенным является температура ($T_{ит}$). Для радиационной кремниевой технологии наиболее важен интервал $T_{ит} = 20–400^\circ\text{C}$, в котором лежат температуры диссоциации основных радиационных дефектов в кремнии. Изменение $T_{ит}$ может приводить к изменению концентрационного соотношения образующихся при облучении РЦ или даже к смене типа центра, доминирующего в кристалле. Это может оказать существенное влияние на перенос носителей заряда в полупроводниковой структуре и, как следствие, изменить совокупность ее электрофизических характеристик. Для полупроводниковых структур силовых приборов, прошедших полный цикл технологических обработок

в процессе изготовления, этот вопрос практически не исследован. При попытке использовать в технологиях реальных структур данные, полученные ранее на экспериментальных образцах [12,13], возникает проблема неконтролируемого изменения параметров облученных приборов.

Цель настоящей работы — выяснить роль температурного режима в процессе электронного облучения на накопление РЦ и связанное с ними изменение основных электрических характеристик технологически завершенных Si структур диодного типа.

2. Эксперимент

Исследовались чипы (приборные p⁺–n–n⁺-структуры до посадки в корпуса) диодов, изготовленных на монокристаллическом Si, легированном фосфором в процессе выращивания по Чохральскому (КЭФ) и с помощью ядерных реакций (КОФ). Структуры были сформированы по стандартной диодной технологии на исходных пластинах двух типов: КЭФ-32 и КОФ-32 толщиной 280–350 мкм путем последовательной диффузии алюминия, бора и фосфора из их окислов на воздухе.

Отбирались образцы, имеющие до облучения одинаковые прямые и обратные вольт-амперные характеристики (ВАХ). Прямое падение напряжения на диоде U_F измерялось (раздельные токовые и потенциальные контакты) при длительности импульса прямого тока 400 мкс в диапазоне до $I_F = 100$ А. Обратный ток I_R контролировался при постоянном смещении $U_R = 1000$ В при температуре $T_j = 25$ и 125°C . Время жизни неравновесных носителей заряда (ННЗ) в n-базе p⁺–n–n⁺-диодов τ_p контролировалось по длительности фазы высокой обратной проводимости при переключении структуры из проводящего состояния в закрытое [14]. Условия опыта (величина импульса прямого тока 1 А при длительности до 80 мкс) соответствовали высокому уровню инъекции. Для получения информации о РЦ применялась мето-

[¶] E-mail: march@ifftp.bas-net.by

дика нестационарной емкостной спектроскопии глубоких уровней (DLTS). Спектры снимались при обратном смещении — 10 В и длительности импульса заполнения ловушек 0.01 с.

Облучение образцов проводилось на линейном импульсном ускорителе электронов с энергией частиц $E_{\text{irr}} = 6 \text{ МэВ}$ (длительность импульса 5 мкс, частота следования импульсов 200 Гц). Интенсивность пучка электронов, падающего на образец, составляла $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, температура образцов в процессе облучения фиксировалась при 25, 100, 160, 250, 300, 350 и 400°C и поддерживалась с точностью $\pm 5^\circ\text{C}$.

Порядок эксперимента сводится к следующему. Вначале диоды облучались одинаковым флюенсом $\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$ при указанных выше температурах. Затем проводилось дополнительное облучение, цель которого — уменьшить до одинаковой величины τ_p в n -базе диодов, облучаемых в условиях различных T_{irr} . Контроль параметров образцов проводился на разных этапах облучения. Отдельные образцы отжигались после облучения в печи на воздухе при температурах в интервале $100\text{--}500^\circ\text{C}$.

3. Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлено изменение величины $\Delta(1/\tau_p) = 1/\tau_{p\Phi} - 1/\tau_{p0}$ (τ_{p0} , $\tau_{p\Phi}$ — время жизни ННЗ до и после облучения соответственно) в диодах, изготовленных на разном исходном материале, в зависимости от температуры облучения. Приведенные данные усреднялись по результатам измерения 5–7 образцов. Рис. 2 иллюстрирует для тех же диодов зависимости прямого падения напряжения и величины приращения обратного

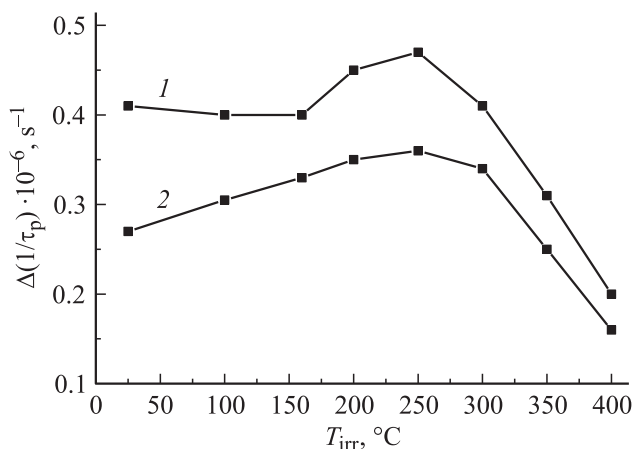


Рис. 1. Зависимость приращения величины, обратной времени жизни неравновесных носителей заряда в $\text{Si } p^+ - n - n^+$ -диодов, от температуры облучения электронами с энергией $E_{\text{irr}} = 6 \text{ МэВ}$ ($\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$): 1 — образцы на КЭФ; 2 — КОФ.

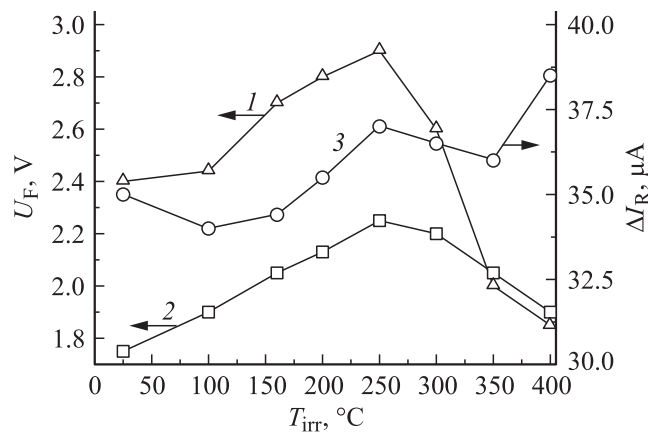


Рис. 2. Изменение прямого падения напряжения (кривые 1, 2) и приращения обратного тока (кривая 3) в $\text{Si } p^+ - n - n^+$ -диодах от температуры облучения электронами с энергией $E_{\text{irr}} = 6 \text{ МэВ}$ ($\Phi = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$): 1, 3 — образцы на КЭФ; 2 — КОФ.

тока $\Delta I_R = I_{R\Phi} - I_{R0}$ (I_{R0} , $I_{R\Phi}$ — величина тока до и после облучения соответственно) от T_{irr} .

Можно отметить некоторые особенности на представленных кривых $\Delta(1/\tau_p)$ (T_{irr}), $U_F(T_{\text{irr}})$ и $\Delta I_R(T_{\text{irr}})$. Для структур на КЭФ при повышении температуры облучения от 20 до 160°C величина $\Delta(1/\tau_p)$, пропорциональная эффективности введения РЦ, несколько снижается. Затем следует ее подъем в интервале $T_{\text{irr}} = 160\text{--}250^\circ\text{C}$, а при дальнейшем увеличении T_{irr} в изменении $\Delta(1/\tau_p)$ наступает спад. Для образцов на КОФ зависимость $\Delta(1/\tau_p)(T_{\text{irr}})$ монотонно нарастает от 20 до 250°C и спадает в интервале $250\text{--}400^\circ\text{C}$.

Поскольку рост U_F в облученных диодах обусловлен увеличением скорости объемной рекомбинации ННЗ в n -базе, то качественный вид зависимостей $U_F(T_{\text{irr}})$ и $\Delta(1/\tau_p)(T_{\text{irr}})$ практически одинаков и полностью соответствует физическим соображениям о взаимосвязи этих параметров, проанализированной в работе [15]. Зависимость ΔI_R от температуры облучения (рис. 2, кривая 3) до $T_{\text{irr}} \leq 250^\circ\text{C}$ близка по виду к зависимости $U_F(T_{\text{irr}})$ и имеет слабо выраженную тенденцию к увеличению при $T_{\text{irr}} > 250^\circ\text{C}$, что отражает, вероятно, характер изменения при облучении основной компоненты обратного тока Si диода — тока генерации.

Наблюдаемое совпадение зависимости U_F и ΔI_R от T_{irr} при $T_{\text{irr}} \leq 250^\circ\text{C}$ дает основание полагать, что в данном интервале температур облучения в определении контролируемых характеристик облученных образцов доминирует один и тот же тип РЦ, в то время как в $p^+ - n - n^+$ -структурах, облученных при $T_{\text{irr}} > 250^\circ\text{C}$, генерация и рекомбинация носителей заряда идут, по-видимому, через различные РЦ.

Как известно [16], при любой температуре облучением в кристалл полупроводника вводится весь набор РЦ, возможных в кристалле с данным примесным составом, однако в изменении свойств домини-

рует несколько вполне определенных РЦ, стабильных при данной температуре. В спектрах ловушек основных носителей заряда в базовом слое облученных p⁺-n-n⁺-диодов мы наблюдали в общей сложности четыре DLTS-пики, связанных с уровнями дефектов. В первых, дефект E1 — A-центр ($E_C - 0.17$ эВ, сечение захвата электронов $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-14}$ см²). Далее уровень E2 ($E_C - 0.23$ эВ, $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-16}$ см²), принадлежащий двукратно отрицательно заряженному состоянию дивакансии. Затем пик E3 ($E_C - 0.35$ эВ, $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-16}$ см²). За пик E4 ($E_C - 0.42$ эВ, $\sigma_n = 2 \cdot 10^{-16}$ см²) ответственные, по крайней мере, два центра: E-центр (вакансия — фосфор) и дивакансия (однократно отрицательно заряженное состояние). Наблюдавшиеся уровни типичны для p-n-структур на n-Si [16]. Каждый из этих комплексов характеризуется определенной энергией связи. По мере повышения температуры облучения наступает диссоциация наименее устойчивых РЦ, что приводит к перестройке и изменению концентрационного соотношения, образующихся при облучении РЦ. При этом основным РЦ, контролирующим темп рекомбинации ННЗ в электронно-облученных структурах, принято считать уровень E1, а после его распада при отжиге — уровень E3 [17].

Проблема создания силовых и быстродействующих полупроводниковых приборов с помощью радиационной технологии связана с достижением разумного компромисса в сочетании совокупности статических и частотных характеристик приборов, которые имеют противоположный характер зависимости от времени жизни неравновесных носителей заряда в полупроводниковой структуре. Оценим возможности использования электронного облучения при повышенных температурах для решения этой технологической задачи.

Анализ DLTS-спектров и данных по отжигу образцов, облученных при различных температурах, позволяет сделать вывод о том, что поведение $\Delta(1/\tau_p)$, ΔI_R и U_F при $T_{irr} \leq 250^\circ\text{C}$ связано с характером зависимости от температуры облучения эффективности накопления уровня E1 и его доминированием в генерационно-рекомбинационных процессах в облученных диодах. В образцах, облученных при более высокой температуре ($> 250^\circ\text{C}$), на эти процессы сказывается, по-видимому, и влияние центра E3, которое по мере повышения T_{irr} будет возрастать. Эффективность введения этого центра, также как и центра E1, монотонно снижается при $T_{irr} > 150^\circ\text{C}$, но он имеет более высокую, чем E1, термостабильность ($\sim 500^\circ\text{C}$) [12,17]. Допустимо предположить, что изменение концентрационного соотношения E1 и E3 может повлечь за собой изменение электрических характеристик диодов.

Следует подчеркнуть, что для корректной оценки степени влияния температуры облучения на чувствительность изменения U_F и I_R и выбора оптимального, с точки зрения технологии, режима радиационной обработки, следует провести сравнение величин U_F и I_R в образцах с одинаковым уровнем τ_p . Результат такого

Параметры диодных структур, облученных при различных температурах электронами с энергией 6 МэВ

| Температура облучения, °C | Параметры | | | | | | | |
|---------------------------|---|--------------------------|----------------------------|----------------------------|---|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | Материал КЭФ-32 Флюенс облучения | | | | Материал КОФ-32 Флюенс облучения | | | |
| | τ_p , мкс | U_F , В ⁽¹⁾ | I_R , мкА ⁽²⁾ | I_R , мкА ⁽³⁾ | τ_p , мкс | U_F , В ⁽¹⁾ | I_R , мкА ⁽²⁾ | I_R , мкА ⁽³⁾ |
| 25 | $\Phi = 6 \cdot 10^{13}$ см ⁻² 2.0 2.4 100 1000 | | | | $\Phi = 9.5 \cdot 10^{13}$ см ⁻² 2.0 2.35 80 800 | | | |
| 250 | $\Phi = 5 \cdot 10^{13}$ см ⁻² 2.0 2.9 100 800 | | | | $\Phi = 8.5 \cdot 10^{13}$ см ⁻² 2.0 2.85 100 500 | | | |
| 300 | $\Phi = 6.5 \cdot 10^{13}$ см ⁻² 2.0 2.15 100 500 | | | | $\Phi = 1.5 \cdot 10^{14}$ см ⁻² 2.0 2.4 150 400 | | | |
| 350 | $\Phi = 1 \cdot 10^{14}$ см ⁻² 2.0 2.0 150 600 | | | | $\Phi = 2.5 \cdot 10^{14}$ см ⁻² 2.0 2.1 140 600 | | | |
| 400 | $\Phi = 4 \cdot 10^{14}$ см ⁻² 2.0 1.8 300 3000 | | | | $\Phi = 9 \cdot 10^{14}$ см ⁻² 2.0 1.75 250 2500 | | | |

Примечание. 1— $T_j = 25^\circ\text{C}$; $I_F = 50$ А; 2— $T_j = 25^\circ\text{C}$; 3— $T_j = 125^\circ\text{C}$. Исходное время жизни в диодах $\tau_{p0} \cong 20$ мкс.

исследования представлен в таблице. Здесь приведены значения параметров p⁺-n-n⁺-диодов на прямой ток 10–15 А и запирающее напряжение 1600 В, изготовленных на n-Si марки КЭФ-32 и КОФ-32, после облучения при $T_{irr} = 25, 250, 300, 350$ и 400°C . Обратим внимание на то, что для выравнивания τ_p в образцах требуются различные дозы облучения. Так, например, для уменьшения τ_p до уровня $\tau_p = 2$ мкс в диодах на КЭФ при $T_{irr} = 25^\circ\text{C}$ необходим флюенс $\Phi = 6 \cdot 10^{13}$ см⁻², а при $T_{irr} = 400^\circ\text{C}$ — $\Phi = 4 \cdot 10^{14}$ см⁻². Для образцов на КОФ при аналогичных условиях облучения требуется $\Phi = 9.5 \cdot 10^{13}$ см⁻² и $\Phi = 9 \cdot 10^{14}$ см⁻² соответственно.

Как видно из данных, приведенных в таблице, температурный режим действительно играет существенную роль в определении электрических характеристик p⁺-n-n⁺-диодов при электронном облучении. Так, наилучшее соотношение между величиной τ_p и U_F может быть получено при $T_{irr} = 400^\circ\text{C}$. По-видимому, это является следствием образования в p⁺-n-n⁺-диодах в условиях данного воздействия, наилучшего для сочетания этих характеристик концентрационного соотношения E1 и E3. Установлено, что для этого случая оно равно $\sim 1 : 4$. Однако обратный ток диода при этом имеет максимальное значение. Более предпочтительным режимом является $T_{irr} = 300^\circ\text{C}$ для приборов на обычном Si (КЭФ) и $T_{irr} = 350^\circ\text{C}$ — для приборных структур на ядерно-легированном Si (КОФ). В этих условиях облучения соотношение концентраций E1 и E3 в образцах составляет $\sim 2 : 3$. Такое сочетание доминирующих уровней в диодах обеспечивает достаточно низкое U_F и небольшой рост I_R при изменении температуры эксплуатации от 25 до 125°C . Механизм формирования ВАХ облученных диодов при наличии в их базовой области

определенной комбинации радиационных центров остается пока невыясненным.

В последующей работе мы надеемся подробно исследовать инжекционные зависимости τ_r для разных центров рекомбинации, установить их взаимосвязь с характеристиками обратного восстановления, используя для этих целей более широкий набор образцов.

4. Заключение

Выполненное исследование показало, что главным условием оптимизации параметров Si диодов при электронном облучении, как наиболее распространенной на сегодняшний день разновидности технологии управления быстродействием, является точный подбор температурного режима этого вида обработки для конкретного изделия. Так, для $p^+ - n - n^+$ -диодов, полученных на n-Si (КЭФ, КОФ) при одинаковой величине τ_r в базовом слое диодов, прямое падение напряжения можно снизить до 30% и в $\sim 2-3$ раза уменьшить зависимость обратного тока от температуры эксплуатации в случае их облучения при $T_{irr} = 300^\circ\text{C}$ (КЭФ) или при $T_{irr} = 350^\circ\text{C}$ (КОФ) по сравнению с другими температурами диапазона $T_{irr} = 20-400^\circ\text{C}$.

Для получения максимального эффекта от этого приема проведению операции облучения основной партии приборов должна предшествовать процедура контрольного облучения тестовых структур, которые прошли полный цикл тех же технологических обработок, что и приборы основной партии.

Авторы выражают благодарность Ф.П. Коршунову за интерес к работе и ее поддержку.

Список литературы

- [1] В.А. Козлов, В.В. Козловский. ФТП, **35**, 769 (2001).
- [2] N. Jankovic, P. Ijic, N. Sakurai. Sol. St. Electron., **54** (3), 268 (2010).
- [3] А.М. Сурма. Электричество, № 9, 20 (2006).
- [4] P. Hazdra, J. Vobecky, H. Dorschner, K. Brand. J. Microelectron., **35**, 249 (2004).
- [5] Патент US № 7049674. Оpubл. 23.05.2006. Патент ВУ № 11307. Оpubл. 05.08.2008.
- [6] В.Н. Губарев, А.М. Сурма, А.В. Ковров. Прикладная физика, № 4, 85 (2001).
- [7] И.Г. Марченко, Н.Е. Жданович. Письма ЖТФ, **36** (10), 45 (2010).
- [8] Ф.П. Коршунов, И.Г. Марченко, Н.Е. Жданович. Изв. НАНБ. Сер. ф-м.н., **46** (3), 81 (2010).
- [9] А.В. Синицын, В.С. Вавилов, В.Б. Глазман. ФТП, **8**, 471 (1974).
- [10] Ф.П. Коршунов, И.Г. Марченко. ФТП, **17**, 540 (1983).
- [11] Ф.П. Коршунов, И.Г. Марченко, В.Т. Трошинский. ДАН БССР, **29**, 523 (1985).
- [12] Т.А. Пагава. ФТП, **40**, 919 (2006).
- [13] Т.А. Пагава, Н.И. Майсурядзе. ФТП, **43**, 750 (2009).
- [14] B. Lax, S.F. Neustadter. J. Appl. Phys., **25**, 1148 (1954).
- [15] Ф.П. Коршунов, Г.В. Гатальский, Г.М. Иванов. Радиационные эффекты в полупроводниковых приборах (Мн., Наука и техника, 1978).
- [16] Вопросы радиационной технологии полупроводников. Под ред. Л.С. Смирнова. (Новосибирск, Наука, 1980).
- [17] Ф.П. Коршунов, И.Г. Марченко, Н.Е. Жданович, В.Т. Трошинский. ДАН БССР, **32**, 781 (1988).

Редактор Л.В. Беляков

Technological peculiarities of electron irradiation of Si $p^+ - n - n^+$ -diodes at elevated temperatures

I.G. Marchenko, N.E. Zhdanovich

State Scientific and Production Association
Scientific-Practical Materials Research Center,
National Academy of Sciences of Belarus,
220072 Minsk, Belarus

Abstract The behavior of nonequilibrium carriers τ lifetime, reverse current I_R and forward voltage drop U_F in industrial $p^+ - n - n^+$ -diodes irradiated by electrons ($E = 6 \text{ MeV}$) at temperatures with the range $T_{irr} = 20-400^\circ\text{C}$ was investigated. The tests were conducted on the samples manufactured on single-crystal Si, phosphorus doped during the CZ growing process of ingot (KAF) and using the nuclear reactions (KOF). The investigation showed that the problem to reach the smaller values τ at minimal increase of U_F and I_R in fast diodes can be solved by means of selection of the technological irradiation temperature regime. It was determined that at the comparable changes of the value of τ in diode base area, the best trade-off of U_F and I_R in the samples (KAF) are observed at $T_{irr} = 300^\circ\text{C}$, and in samples KOF — at $T_{irr} = 350^\circ\text{C}$.