

УДК 621.382.2

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ОПТИМИЗАЦИИ ПЕРЕХОДНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ ДИОДОВ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ЭЛЕКТРОНАМИ****© 2024 г. И. В. Шемеров^{а,*}, П. Б. Лагов^а, С. П. Кобелева^а,
В. Д. Кирилов^а, А. С. Дренин^б, А. А. Мещеряков^б**^аНациональный исследовательский технологический университет “МИСИС”,
Россия, 119049, Москва, Ленинский просп, 4^бАкционерное общество “Российские космические системы”
Россия, 111250, Москва, ул. Авиамоторная, 53*e-mail: schemerov.iv@misis.ru

Поступила в редакцию 15.08.2023 г.

После доработки 22.09.2023 г.

Принята к публикации 06.10.2023 г.

Показано, что измерение зависимости полной емкости полупроводникового диода от измерительной частоты позволяет оценить пределы оптимизации переходных характеристик полупроводниковых структур при облучении. Проведено исследование изменения времени восстановления обратного тока в выпрямительных диодах на основе монокристаллического кремния после облучения структуры высокоэнергетическими электронами. С увеличением суммарной плотности потока электронов облучения от 10^{14} до 10^{15} см⁻² время восстановления обратного тока падает от единиц миллисекунд до десятков микросекунд. При этом параллельно с ускорением переходных характеристик структуры стремительно деградируют. Ток насыщения возрастает на два порядка: от $7 \cdot 10^{-9}$ А/см² до $8 \cdot 10^{-7}$ А/см², а последовательное сопротивление растет от 0.5 до 90 Ом. Зависимость полной емкости полупроводникового диода от измерительной частоты позволяет оценить предел оптимизации рабочей частоты: частота, на которой емкость равна половине от стационарной, с увеличением суммарной плотности потока электронов облучения растет, достигая максимума, после чего существенно снижается из-за деградации проводимости. Это может выступать важным критерием при радиационной оптимизации полупроводниковых приборов.

DOI: 10.31857/S0032816224030197 EDN: OTKGNU

1. ВВЕДЕНИЕ

Радиационная обработка является одним из важных технологических этапов в производстве полупроводниковых приборов. Радиационная обработка позволяет оптимизировать такие важные характеристики, как рабочая частота, скорость релаксации фототока и время восстановления обратного тока [1]. В устройствах на базе непрямозонных полупроводников, вроде монокристаллического кремния, основным механизмом рекомбинации является рекомбинация по механизму Шоккли–Рида–Холла, которая

линейно зависит от концентрации рекомбинационных центров. При облучении высокоэнергетическими частицами создаются дополнительные дефекты, которые уменьшают время жизни неравновесных носителей заряда и тем самым повышают скорость переключения устройств. На этом принципе основана радиационная обработка СВЧ-транзисторов и импульсных диодов [2–4]. При этом облучение неизбежно ухудшает другие рабочие характеристики устройств. Например, для выпрямительных диодов величина последовательного сопротивления в прямом включении должна быть как можно меньше,

чтобы вклад омической составляющей базовых областей несильно менял падение напряжения. Облучение существенно увеличивает концентрацию дефектов, уменьшая подвижность носителей и зачастую компенсируя часть электрически активной примеси. Таким образом, последовательное сопротивление возрастает, что отрицательно сказывается на рабочих характеристиках выпрямительного диода [5]. Поиск баланса между положительными и отрицательными сторонами данной процедуры является важной задачей в технологическом процессе производства полупроводниковых приборов.

Целью данного исследования являлась демонстрация определения пределов оптимизации переходных характеристик в выпрямительных диодах на основе монокристаллического кремния, последовательным сопротивлением и рабочей частотой устройства после облучения электронами с энергией 5 МэВ.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования являлись коммерчески доступные выпрямительные диоды 1N4007 на основе монокристаллического кремния. Несколько серий образцов подвергалось последовательному облучению электронами с энергией 5 МэВ. Облучение образцов диодов проводили в лаборатории радиационных технологий ИФХЭ РАН на линейном ускорителе электронов с энергией 5 МэВ в воздушной среде при плотности потока электронов $8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$. Температура образцов не превышала 40°C . После облучения дополнительный отжиг не проводился. Образцы были разделены в соответствии с полученной дозой облучения на несколько групп, характеризующихся интегральной плотностью потока электронов — флюенсом $\Phi = 8 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $1.5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, $1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Для каждой группы образцов были измерены вольт-амперные, вольт-фарадные характеристики, зависимости емкости диодной структуры от измерительной частоты и времени восстановления обратного тока. Токовые измерения проводились при комнатной температуре при помощи источника/измерителя Keysight B2902A, емкостные измерения проводились при помощи прецизионного измерителя LRC Keysight E4980A. Измерение времени восстановления проводилось по методике, описанной

ранее в работе [6]: при измерении времени восстановления прямой ток составлял 20 мА, обратный ток величиной 10 мА регистрировался по падению напряжения на последовательном сопротивлении величиной 10 Ом.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерений вольт-амперных характеристик приведены на рис. 1. По полученным данным были найдены величины последовательного сопротивления базовой области диода R_S и тока насыщения I_S . Данные приведены в табл. 1.

На графиках видно, что с увеличением накопленной дозы значение R_S монотонно увеличивается. Если начальная величина была незначительна и позволяла использовать выпрямительный диод при токах до единиц ампер, то последовательное сопротивление порядка нескольких десятков ом уже не позволит использовать структуру для работы с токами выше сотен миллиампер. Помимо уменьшения величины прямого тока также существенно растет ток утечки, обусловленный генерационно-рекомбинационной компонентой в области p - n -перехода [7]. При этом доза облучения до некоторого предела меняет электрические параметры структуры очень слабо.

Результаты измерений зависимости полной емкости диодной структуры от измерительной частоты при нулевом смещении приведены на рис. 2. Измерения проводились при переменном сигнале амплитудой 0.1 В.

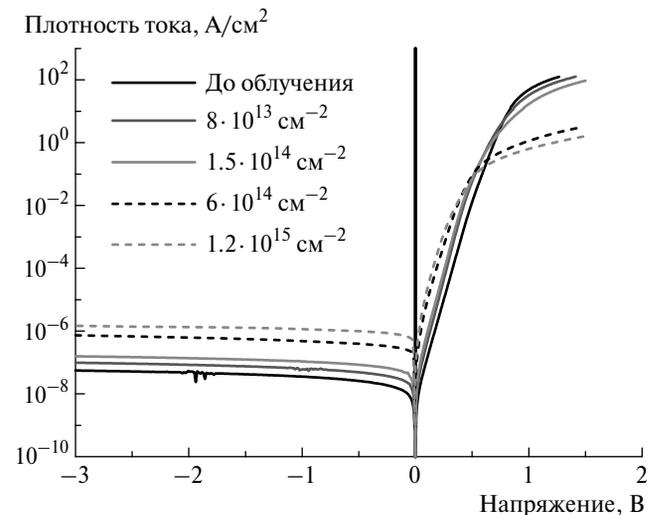


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики диодов до и после облучения.

Таблица 1. Параметры диодов до и после облучения

Интегральная плотность потока электронов Φ , см^{-2}	0	$8 \cdot 10^{13}$	$1.5 \cdot 10^{14}$	$6 \cdot 10^{14}$	$1.2 \cdot 10^{15}$
R_S , Ом	0.5	0.8	1.2	37	92
I_S , $\text{нА} \cdot \text{см}^{-2}$	7	20	40	400	800
$f_{\text{гр}}$, кГц	300	800	560	25	20
t_{RR} , мкс	2000	1000	130	20	14

Зависимость емкости диода от измерительной частоты показывает, насколько быстро успевает перезаряжаться структура. В диодах на базе прямозонных материалов это время связано со временем удаления носителей из базы и концентрацией центров захвата. В диодах на базе непрямозонных полупроводников, в частности монокристаллического кремния, время перезарядки области пространственного заряда определяется главным образом временем жизни неравновесных носителей заряда. При облучении время жизни уменьшается за счет увеличения концентрации рекомбинационных центров (как правило, это пары Френкеля [8]), за счет чего начинает возрастать граничная частота, $f_{\text{гр}}$, $p-n$ -перехода (которая может быть определена как частота, при которой высокочастотная емкость падает вдвое по сравнению с низкочастотной). Возрастание это немонотонное: с увеличением поглощенной дозы начинают сказываться эффекты деградации электрических характеристик. При облучении увеличивается характерное время релаксации RC -цепочки τ_{RC} , образованной последовательным сопротивлением R_S и емкостью области пространственного заряда. В тот момент, когда частота $f_{\text{гр}}$ начинает в первую очередь определяться временем τ_{RC} , дальнейшее облучение будет приводить только к ее уменьшению. Зависимость величины $f_{\text{гр}}$ от Φ приведена в табл. 1.

На рис. 3 приведены вольт-фарадные характеристики для различных образцов. Измерения проводились при переменном напряжении 0.1 В. Искажения, вызванные облучением с $\Phi = 1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$, очень велики. Кривая, соответствующая данному образцу, приведена на врезке.

Наклон кривых зависимости $1/C^2$ от напряжения говорит о концентрации электрически активной примеси в полупроводнике. В данном случае при $\Phi < 6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ концентрация состав-

ляет $1.4 \cdot 10^{14} \pm 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Только наибольшая доза облучения приводит к существенному изменению концентрации: она становится равна $3 \cdot 10^{13} \pm 1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, что говорит о значительной компенсации, т. е. о большом количестве создаваемых облучением дефектов. При энергии

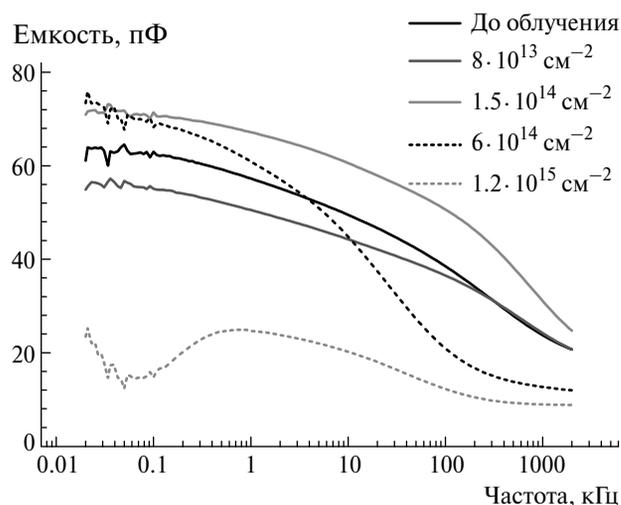


Рис. 2. Зависимость емкости диодов от измерительной частоты до и после облучения.

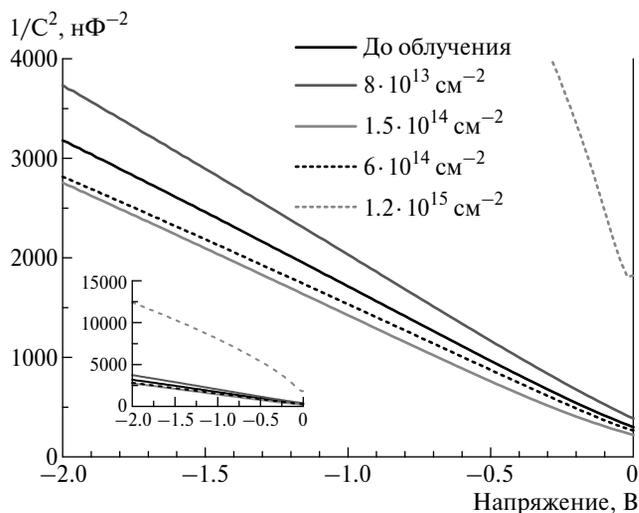


Рис. 3. Вольт-фарадные характеристики диодов до и после облучения.

электронов 5 МэВ длина свободного пробега составляет десятки миллиметров, что в несколько раз превышает толщину измеряемого образца. Таким образом, распределение радиационных центров по толщине образца однородно. В работе [8] показано, что облучение монокристаллического кремния, очищенного методом бестигельной зонной плавки, приводит к значительному росту так называемых E -центров, т. е. электрически активных комплексов вакансии с примесным атомом, которые ведут себя как акцепторный глубокий уровень с энергией порядка $E_V + 0.8$ эВ. Эти центры захватывают свободные электроны, тем самым компенсируя проводимость n -типа, а также добавляют незначительную акцепторную проводимость. Это и приводит к наблюдаемому снижению концентрации электрически активной примеси.

Важным результатом облучения является существенное уменьшение рекомбинационного времени жизни τ_V . В диодных структурах оно выражается в уменьшении времени восстановления обратного тока (t_{RR}). Время восстановления обратного тока является важной характеристикой скорости переключения в выпрямительных диодах, для его измерения используется классический метод Лэкса [9], иногда учитывающий дополнительные поправки [10]. Осциллограмма релаксации диода после переключения приведена на рис. 4. Результаты измерения t_{RR} приведены в табл. 1. При измерении необлученного образца в осциллограмме обратного напряжения наблюдается классическая “полочка”, определяющая время, в течение которого обратный ток поддерживается рекомбинацией неосновных

носителей в базовой области диода [11]. После облучения t_{RR} уменьшается в десятки раз. Рекомбинационное время жизни связано с t_{RR} следующим соотношением [12, 13]:

$$\operatorname{erf} \sqrt{\frac{t_{RR}}{\tau_V}} = \left(1 + \frac{I_{\text{обр}}}{I_{\text{пр}}}\right)^{-1}, \quad (1)$$

где $I_{\text{обр}}$ — величина обратного тока в “полочке”, $I_{\text{пр}}$ — величина прямого тока перед переключением.

Используя выражение (1) и тот факт, что величины $I_{\text{обр}}$ и $I_{\text{пр}}$ для всех измерений относятся друг к другу как 1:2, можно рассчитать значения τ_V . В данном случае $\tau_V \approx 2 t_{RR}$. До облучения рекомбинационное время жизни составляло 4000 мкс, после облучения флюенсом $\Phi = 1.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ оно уменьшается до 30 мкс.

Видно, что облучение существенно ускоряет процесс переключения диода. Это обусловлено увеличением концентрации рекомбинационных центров, благодаря которым неосновные носители быстрее покидают базу при приложении обратного смещения. В то же время данные зависимости не могут говорить о том, что диод становится “более быстрым”, так как кроме τ_V на скорость работы диода влияет τ_{RC} , которая растет из-за увеличения последовательного сопротивления.

При облучении полупроводников высокоэнергетическим излучением важно представлять, насколько интенсивно частицы порождают дефекты. Это характеризуется величинами коэффициента размножения ν и темпом генерации пар Френкеля η [8, 14]. При облучении кристаллов высокоэнергетические частицы сталкиваются с атомами основного вещества и передают часть своей энергии, после чего первичные выбитые атомы за счет дальнейших соударений могут приводить ко вторичным эффектам, в том числе к каскаду смещений. Соотношение между первичными и вторичными эффектами во многом определяется энергией излучения. Так, при облучении монокристаллического кремния электронами с энергией порядка 5 МэВ средняя энергия, которую первичные выбитые атомы приобретают при столкновении, составляет примерно 100 эВ, что при значении пороговой энергии смещения атома из узла решетки для кремния 25 эВ дает коэффициент размножения $\nu \approx 1.9$. В достаточно толстых полупроводниках это приводило бы к темпу генерации $\eta \approx 4 \text{ см}^{-1}$,

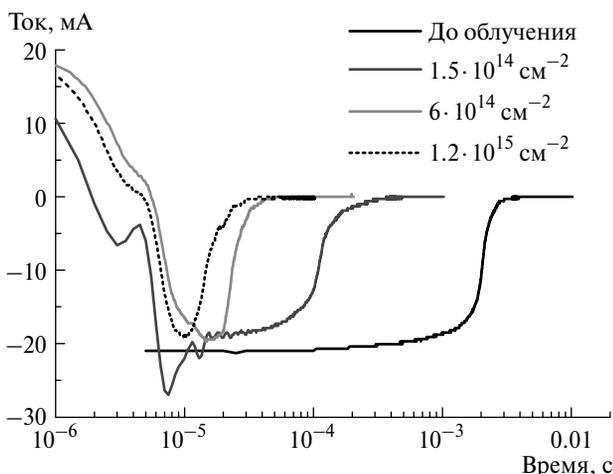


Рис. 4. Восстановление обратного тока диодов до и после облучения.

т. е. один электрон, пролетая путь в 1 см полупроводника без потерь энергии, должен был бы рождать четыре пары Френкеля. Впрочем, при облучении образцов большой толщины электроны быстро теряют энергию вдоль пути пролета, поэтому реальный темп генерации уменьшается. Если проводить испытания на образцах малой толщины, как в данном эксперименте, то количество генерируемых пар также становится существенно меньше.

Монотонное уменьшение времени жизни неравновесных носителей заряда свидетельствует об увеличении числа рекомбинационных центров. Основными такими центрами в монокристаллическом кремнии являются комплекс вакансия + кислород ($E_C - 0.17$ эВ), дивакансия ($E_C - 0.45$ эВ), комплекс вакансия + фосфор ($E_C - 0.4$ эВ) и комплекс вакансия + бор ($E_V + 0.21$ эВ) [7, 8, 15–17]. Они работают как рекомбинационные центры и существенно ускоряют переключение устройства. Вместе с этим они связывают электрически активную примесь и тем самым производят компенсирующий эффект, увеличивая последовательное сопротивление структуры.

Таким образом, можно заключить, что радиационная обработка выпрямительных диодов может до некоторой степени улучшить переходные характеристики. Однако улучшение имеет предел, обусловленный деградацией электрических характеристик устройства. Интегральной характеристикой, включающей в себя и рекомбинационные, и электрические свойства измеряемых структур, можно считать зависимость емкости от частоты, так как она включает в себя изменение рабочей частоты при изменении τ_v и τ_{RC} . В данном эксперименте пределом оптимизации является облучение с $\Phi = 8 \cdot 10^{13} - 1.5 \cdot 10^{14}$ см⁻². При превышении данного предела характеристики выпрямительных диодов существенно деградировали.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Измерения, проведенные на кремниевых выпрямительных диодах с $p-n$ -переходом после облучения электронами с энергией 5 МэВ, показали, что с увеличением дозы облучения уменьшается время восстановления обратного тока и, соответственно, время жизни неравновесных носителей заряда в базовой области диода. В то же время это не говорит об увеличении рабочей

частоты устройства, потому что с увеличением накопленной дозы растет величина последовательного сопротивления, что связано с частичной радиационной компенсацией проводимости. Рост последовательного сопротивления приводит к значительному падению граничной частоты. По зависимости емкости от частоты можно определить предел оптимизации переходных характеристик устройства. В данной работе максимум граничной частоты наблюдался при $\Phi > 8 \cdot 10^{13} - 1.5 \cdot 10^{14}$ см⁻². Для этой серии образцов при значении интегральной плотности потока, не превышающей этот уровень, величина последовательного сопротивления растет незначительно, однако время переключения уменьшилось существенно.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают признательность заведующему лабораторией радиационных технологий ИФХЭ РАН Ю.С. Павлову за помощь в проведении работ по облучению экспериментальных образцов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке министерства науки и высшего образования РФ (грант №075-15-2022-581).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Baliga B.J., Sun E.* // IEEE Transactions on Electron Devices. 1977. V. 24. I.6. P. 685. <https://doi.org/10.1109/T-ED.1977.18803>
2. *Kang I.H., Kim S.C., Bahng W., Joo S.J., Kim N.K.* // IEEE Transactions on Power Electronics. 2012. V. 27. № 2. P. 619. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2011.2161889>
3. *Lauritzen P.O., Ma C.L.* // IEEE Transactions on Power Electronics. 1991. V. 6. № 2. P. 188. <https://doi.org/10.1109/63.76804>
4. *Dastfan A.* // Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Power Systems, Beijing, China, September 15–17, 2007. P. 48. <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2007beijing/papers/554-563.pdf>
5. *Baliga B.J., Walden J.P.* // Solid-State Electronics. 1983. V. 26. № 12. P. 1133. <https://doi.org/10.1016/0038-1101%2883%2990140-5>
6. *Щемеров И.В., Поляков А.Я., Лагов П.Б., Кобелева С.П., Кочкова А.И. и др.* // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2023. Т. 89. № 7. С. 25. <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2023-89-7-25-33>

7. *Ладыгин Е.А.* Радиационная технология твердотельных электронных приборов // М.: ЦНИИ “Электроника”, 1976.
8. *Козловский В.В., Васильев А.Э., Емцев В.В., Оганесян Г.А., Колгатин С.Н.* // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2011. № 122 (2). С. 13.
9. *Lax V., Neustadter S.F.* // J. Appl. Phys. 1954. V. 25. P. 1148.
<https://doi.org/10.1063/1.1721830>
10. *Айзенштат Г.И., Ющенко А.Ю.* // Приборы и техника эксперимента. 2015. № 2. С. 118.
<https://doi.org/10.7868/S0032816215010255>
11. *Schroder D.K.* Semiconductor material and device characterisation. Tempe: Wiley, 2006.
<http://doi.org/10.1002/0471749095.ch2>
12. *Dean R.H., Nuese C.J.* // IEEE Transactions on Electron Devices. 1971. V. 18. № 3. P. 151.
<http://doi.org/10.1109/T-ED.1971.17167>
13. *Григорьев Б.И., Рудской В.А., Тогатов В.В.* // ПТЭ. 1981. № 4. С. 226.
14. *Ziegler J.F., Biersack J.P., Littmark U.* The Stopping and Range of Ions in Solids. New York: Pergamon Press, 1985.
http://doi.org/10.1007/978-3-642-68779-2_5
15. *Вовк О., Марченко М., Соколов В.* // Современная электроника. 2022. № 5. С. 58.
Corbett J.W., Watkins G.D. // Phys. Rev. 1965. V. 138. P. A555.
<https://doi.org/10.1103/PhysRev.138.A555>
16. *Мальханов С.Е.* // Физика и техника полупроводников. 1994. Т. 28. № 8. С. 1431.