

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В КРЕМНИЕВОЙ p^+pn^+ -СТРУКТУРЕ

О.А. Абдулхаев, Г.О. Асанова, Ф.А. Гиясова, Д.М. Ёдгорова,
А.А. Каримов, А.В. Каримов

Физико-технический институт НПО “Физика-Солнце” АН Руз (Ташкент)
Узбекистан

Поступила в редакцию 22.06.2011

На основании исследования переходных характеристик кремниевой p^+pn^+ -структуры методом переключения из прямого направления на обратное определены зависимости времени жизни неосновных носителей заряда и времени восстановления обратного тока в кремниевых p^+pn^+ -структурах с различной толщиной базовой области. Экспериментально показано, что как зависимости времени восстановления, так и времени жизни неосновных носителей от величины прямого тока стремятся к насыщению, которую можно объяснить наличием дополнительных рекомбинационных центров в базовой области.

Ключевые слова: переходные процессы, время жизни неосновных носителей, время восстановления обратного тока, рекомбинационные центры, толщина базовой области, диффузионная емкость.

На підставі дослідження перехідних характеристик кремнієвої p^+pn^+ -структури методом перемикання із прямого напрямку на зворотній визначені залежності часу життя неосновних носіїв заряду та часу відновлення зворотного струму в кремнієвих p^+pn^+ -структурах з різною товщиною базової області. Експериментально показано, що як залежності часу відновлення, так і часу життя неосновних носіїв від величини прямого струму прагнуть до насичення, яку можна пояснити наявністю додаткових рекомбінаційних центрів у базовій області.

Ключові слова: перехідні процеси, час життя неосновних носіїв, час відновлення зворотного струму, рекомбінаційні центри, товщина базової області, дифузійна ємність.

Based on the research of transitional characteristics of silicon p^+pn^+ -structure by method of switching from direct to reverse bias are obtained the dependences of the lifetime of minority carriers, and recovery time of the reverse current in silicon p^+pn^+ -structures with different thickness of the base region. It is experimentally shown that the dependences of the recovery time as well as minority carriers lifetime from values of forward current tends to saturation, which can be explained by the presence of additional recombination centers in the base region.

Keywords: transient processes, minority carriers' lifetime, recovery time of reverse current, recombination centers, thickness of the base region, diffusion capacity.

Физические процессы, протекающие при работе полупроводниковых диодов и транзисторов, во многом определяются переходными характеристиками. Такие параметры как быстродействие, частотный диапазон обратно пропорциональны времени жизни неосновных носителей. В силовых диодах время жизни неосновных носителей определяет максимальную предельную частоту. В работе [1] для улучшения параметров кремниевых p^+n -структур предложено на диод подавать короткий модифицирующий импульс прямого тока, который приводит к целенаправленному изменению времени жизни неоснов-

ных носителей заряда. Предполагается что, при воздействии разогревающим импульсом в запрещенной зоне кремния появляются новые рекомбинационные центры ответственные за изменение функциональных характеристик. Первые результаты по распределению концентрации основных носителей заряда и эффективного времени жизни неосновных носителей заряда в толстых (1.6 мм) пластинах GaAs после поверхностного геттерирования приведены в работе [2]. Установлено, что как одностороннее, так и двухстороннее покрытие пластин GaAs пленками Y и их последующая термообработка при тем-

пературах 700 – 800 °С позволяет получать высокоомный материал с однородным распределением, как концентрации электронов, так и эффективного времени жизни дырок по толщине пластин. Рекомбинационные центры неосновных носителей заряда можно вводить также при облучении полупроводниковых приборов быстрыми частицами или гамма-квантами [3]. Такие методы обработки применимы как для готовых приборов, так и для приборных структур. При этом оптимизацию параметров облученных электронами приборных структур предлагается проводить путем изохронного отжига радиационных дефектов.

Для ряда биполярных приборов, работа которых связана с инжекцией неосновных носителей, особенно работающих в области высоких напряжений, время жизни неосновных носителей чрезвычайно важно для таких параметров как: падение напряжения в открытом состоянии, динамические характеристики при включении и выключении. Обычно компромисс между этими конкурирующими параметрами достигается путём облучения электронами, протонами или легированием примесями, дающими глубокие уровни в кремнии. Кроме того, время жизни является важным параметром для характеристики самого полупроводникового материала, его структурного совершенства. В связи с этим исследования переходных процессов в полупроводниковых структурах представляют большой интерес.

При переключении диода с прямого направления на обратное (рис. 1) вначале протекает фаза рассасывания накопленного заряда, длительность которой равна t_1 [4]

$$t_{\text{рас}} = \frac{Q}{I_{\text{рас}}} = \tau_{\text{эфф}} \frac{I_{\text{пр}}}{I_{\text{рас}}}, \quad (1)$$

где $I_{\text{рас}}$ – обратный ток рассасывания. Длительность второй фазы восстановления обратного тока – определяется дрейфовым процессом под действием поля в базе и по порядку величина близка к

$$t_{\text{восст}} = \frac{W_i}{2} \frac{W_i}{\mu U_i}. \quad (2)$$

Среди известных методов исследования переходных процессов представляет интерес

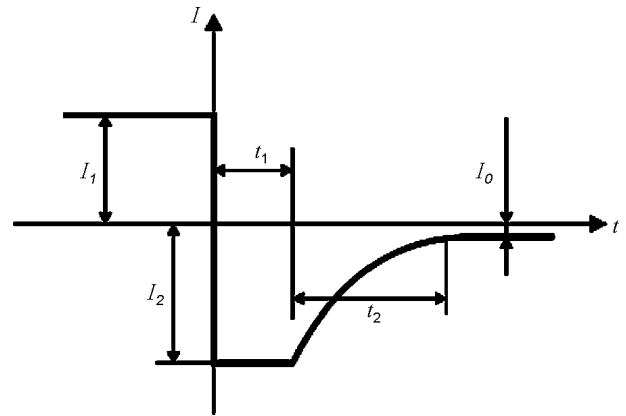


Рис. 1. Временная диаграмма переходного процесса при переключении диода из прямого направления в обратное [4].

импульсный метод, который позволяет определить даже при больших плотностях тока с высокой точностью эффективное время жизни неосновных носителей и объемное время жизни. В этом методе прямой ток задается источником постоянного напряжения, переключение осуществляется генератором прямоугольных импульсов, переходный процесс наблюдается на осциллографе. После измерения длительности полочки t_1 время жизни неосновных носителей заряда τ_p вычисляется по формуле [5]

$$\text{erf} \cdot \sqrt{\frac{t_1}{\tau_p}} = \frac{1}{1 + \frac{I_{\text{обр}}}{I_{\text{прям}}}}. \quad (3)$$

В настоящей работе приводятся результаты исследования зависимости времени жизни неосновных носителей заряда от температуры и толщины базовой области кремниевой p^+pn^+ -структуры.

Исследуемые кремниевые p^+pn^+ -структуры (рис. 2а) аналогичны типичным pin -диодам характеризуемым тем, что в них между двумя сильно легированными областями очень низкого сопротивления p^+ и n^+ находится активная базовая i -область с высоким удельным сопротивлением (p -типа с $\rho = 1000 \text{ Ом}\cdot\text{см}$). Однако толщина базы исследуемых структур на порядок больше по сравнению, чем в типичных структурах (200 – 500 мкм против 3 – 30 мкм [6,7]). Заряды донорных и акцепторных ионов расположены вблизи границы с i -областью и в случае, когда i -область имеет размеры меньше чем диффузионная длина

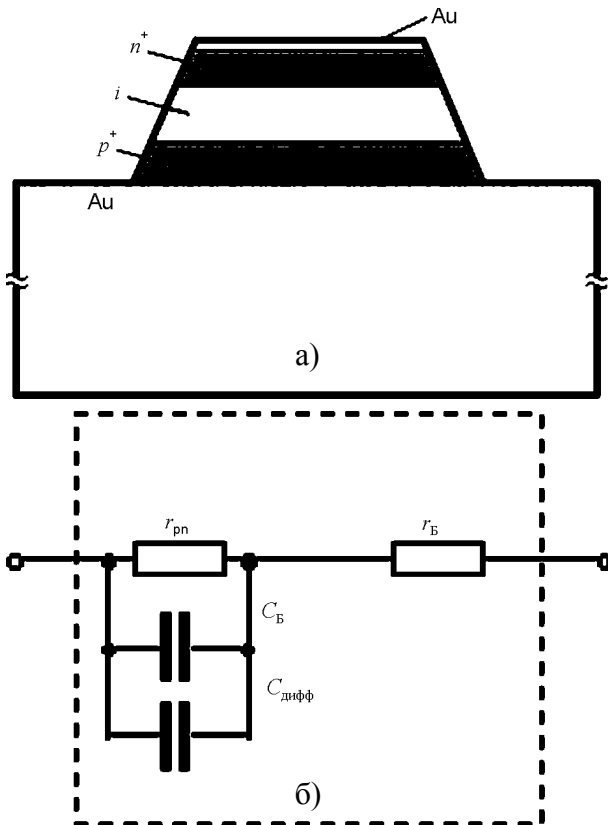


Рис. 2. Структура (а) и эквивалентная схема (б) p - i - n -диода [7].

неосновных носителей она полностью охватывается слоем объемного заряда и превращается в конденсатор с обкладками из p^+ и n^+ -областей, емкость которой, так называемой барьерной – C_B , практически не зависит от величины приложенного напряжения.

При переключении диода из прямого направления в обратное до момента $t = 0$, ток через p - n -переход будет отсутствовать, и концентрация дырок в базе определяется равновесным значением. С момента включения диода происходит инжекция дырок из p^+ -области и электронов из n^+ -области в i -область. Ток дырок рекомбинирующих в базе, пропорционален избыточному заряду дырок – и обратно пропорционален времени жизни дырок. На начальной стадии процесса, пока заряд дырок мал, ток рекомбинации много меньше тока инжекции дырок и скорость накопления дырок в базе велика. При этом его прямое сопротивление резко падает. По мере увеличения заряда дырок в базе растет количество дырок, рекомбинирующих с электронами, и скорость накопления дырок уменьшается. И в конечной стадии переходного про-

цесса устанавливается динамическое равновесие между током дырок, инжектированных в базу, и током дырок, рекомбинирующих в базе с электронами. Соответственно, изменение заряда инжектированных неосновных носителей создает диффузионную емкость – C_{diff} положительный и отрицательный заряды, которой оказываются в одной и той же области и пространственно не разделены, как в барьерной емкости или конденсаторе.

При обратном напряжении происходит экстракция носителей из i -области в соседние области. Уменьшение концентрации носителей в базе приводит к дополнительному возрастанию сопротивления i -области по сравнению с равновесным состоянием увеличивая отношение прямого и обратного сопротивлений, что важно при использовании p^+pn^+ -диодов в переключательных режимах. Время, в течение которого обратный ток постоянен, называют временем рассасывания инжектированных носителей. Для импульсных диодов время рассасывания избыточных неосновных носителей $t_{рас}$ и время жизни неосновных носителей заряда τ_p являются важными параметрами. Для уменьшения их значения существуют несколько способов. Во-первых, можно уменьшать время жизни неравновесных носителей в базе диода за счет введения глубоких рекомбинационных центров в квазинейтральном объеме базы. Во-вторых, можно делать базу диода тонкой для того, чтобы неравновесные носители рекомбинировали на тыльной стороне базы.

Так как концентрации носителей в базовой области исследуемых структур имеют одни и те же значения $1 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ то, можно полагать, что области объемных зарядов создающих барьерные емкости у них одинаковы. Однако толщины базовых областей различаются, причем больше диффузионной длины. Соответственно, можно заключить, что в них отличия создаются за счет диффузионных емкостей и сопротивлений базы (рис. 2), толщины которых отличаются.

Зависимости времени жизни неосновных носителей заряда от величины прямого тока для кремниевых p^+pn^+ -структур с различной толщиной базовой области приведены на рис. 3.

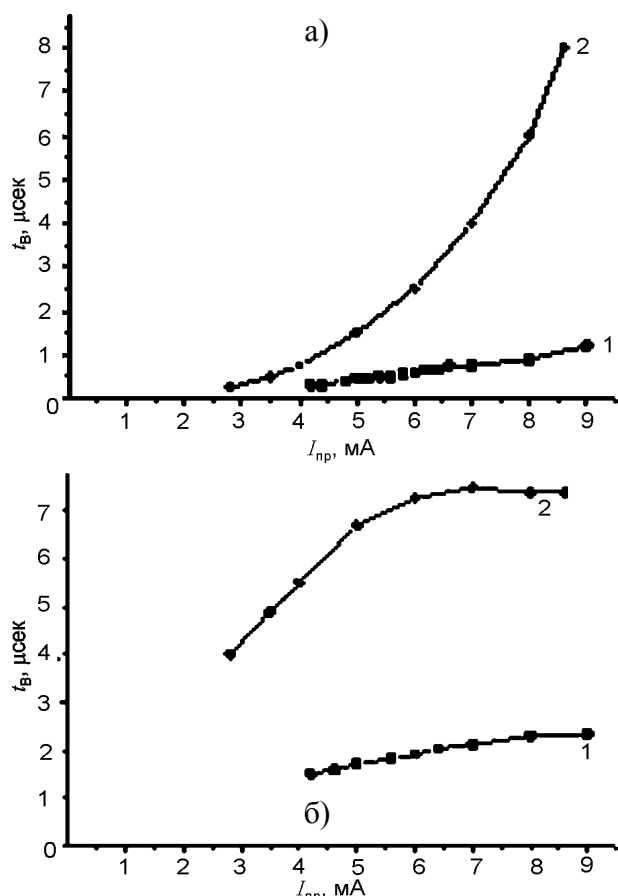


Рис. 3. Зависимости времени восстановления обратного тока (а) и времени жизни неосновных носителей заряда (б) от величины прямого тока для кремниевых p^+pn^+ -структур с различной толщиной базовой области: 1 – 250 мкм, 2 – 400 мкм.

Из рис. 3 следует, что в образцах с толщиной базовой области меньше 300 мкм имеем сравнительно медленный рост времени жизни неосновных носителей заряда, что способствует сохранению его частотных свойств и при увеличении рабочего тока. Для образца толщиной базовой области 400 мкм наблюдается тенденция увеличения (до двух крат) времени жизни неосновных носителей заряда, однако после выравнивания прямого и обратного токов оно стремится к насыщению.

Время восстановления обратного тока, характеризующая время рассасывания накопленных дырок свидетельствует о быстродействии p^+pn^+ -структур при малых токах независимо от толщины базы. Однако по мере увеличения прямого тока на образце с толстой базой время рассасывания носителей увеличивается, а в структуре с толщиной базы 250 мкм, как время жизни (1.5 мсек), так и время восстановления (300 нсек) имеют низкие значения.

То есть они определяются не толщиной базовой области (формула (2)), а толщиной обедненного слоя. Так как в наших структурах толщина базовой области больше диффузионной длины толщина в формуле (2) соответствует толщине обедненного слоя. Тогда время восстановления при малых токах будет иметь независимо от толщины базы близкие значения как получено на эксперименте, рис. 3а.

При подаче прямого смещения на диод происходит накопление заряда в базовой области, что в свою очередь образует диффузионную емкость. Она связана с процессами накопления и рассасывания неравновесного заряда в базе и характеризует инерционность движения неравновесных зарядов в области базы. Диффузионная емкость определяется следующим выражением [7]:

$$C_{\text{дифф}} = \frac{q\tau_n}{2kT} I_{\text{прям}}, \quad (4)$$

где τ_n – время жизни неосновных носителей.

Из формулы (4) видно, что величина диффузионной емкости прямо пропорциональна току через p - n -переход, и чем меньше количество накопленного заряда, тем меньше диффузионная емкость.

Для повышения быстродействия диодов наряду со снижением времени жизни неосновных носителей целесообразно принять меры по уменьшению диффузионной и барьерной емкости – (уменьшая площадь p - n -перехода), а также снижая сопротивление базы. Уменьшение времени жизни неосновных носителей можно осуществить за счет создания дополнительных рекомбинационных центров для накопленных зарядов-дырок. Как показали исследования температурной зависимости времени жизни неосновных носителей в исследуемой p^+pn^+ -структуре с толщиной базовой области 250 мкм (рис. 4.), имеются дополнительные рекомбинационные центры, которую определяли на основе температурной зависимости времени жизни неосновных носителей от обратной температуры по энергии активации дополнительных центров рекомбинации [8]:

$$\Delta E_a = \frac{k}{q} \cdot \frac{(\ln \tau_2 - \ln \tau_1)}{1/T_1 - 1/T_2}. \quad (5)$$

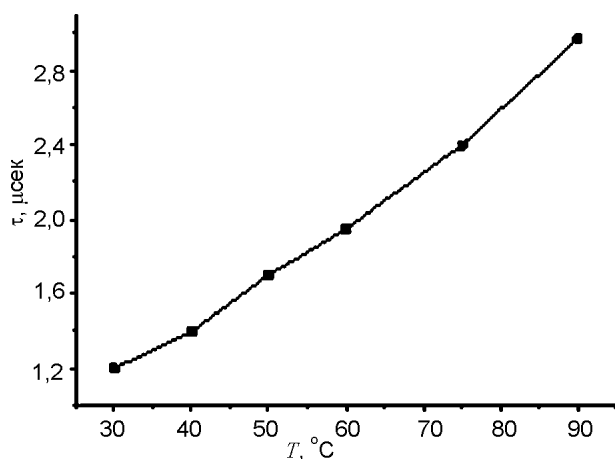


Рис. 4. Зависимости времени жизни неосновных носителей от температуры.

Ее значение оказалось равной $\Delta E_a = 0.14$ эВ. Этот центр рекомбинации является ответственным за наблюдаемые низкие значения времени жизни неосновных носителей и времени восстановления обратного тока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании исследования переходных характеристик кремниевой p^+pn^+ -структуры методом переключения из прямого направления на обратное определены зависимости времени жизни неосновных носителей заряда и времени восстановления обратного тока в кремниевых p^+pn^+ -структурах. Экспериментально показано, что в образцах с толщиной базовой области большей диффузионной длины время жизни неосновных носителей заряда и время восстановления обратного тока ведут себя неоднозначно. Так, время восстановления обратного тока, вместо увеличения с толщиной базы, имеет независимо от толщины близкие значения. При этом в образце толщиной базы 250 мкм, как зависимости времени восстановления, так и времени жизни неосновных носителей от величины прямого тока стремятся к насыщению, что можно объяснить наличием дополнительных рекомбинационных центров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кушниренко В.В., Нинидзе Г.К., Павлюк С.П., Савицкий С.М., Третьяк О.В. Воздействие импульсов прямого тока на время жизни неосновных носителей заряда в p - n -диоде//ТКЭА. – 2007. – № 1. – С. 32-35.

2. Андриевский В.Ф., Гореленок А.Т., Загорельская Н.А., Каманин А.В., Шмидт Н.М. Концентрационные профили основных и эффективного времени жизни неосновных носителей заряда в геттерированном GaAs//Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27, Вып. 23. – С. 67-72.
3. Коршунов Ф.П., Богатырев Ю.В., Ластовский С.Б., Кульгачев В.И., Ануфриев Л.П., Рубцевич И.И., Глухманчук В.В., Голубев Н.Ф. Радиационно-термическая обработка мощных кремниевых диодов// ФТТ. – 2005. – № 1. – С. 419-422.
4. Гуртов В.А., Артамонов О.Н., Ветров А.С. Твердотельная электроника. – Москва, 2005. – 492 с.
5. Чистяков Ю.Д., Достанко А.П., Баранов В.В. Методы исследования инжекционных свойств невыпрямляющих контактов//Обзоры по электронной технике. Серия. Полупроводниковые приборы. Вып.7. – М.:ЦНИИ Электроника, 1974.
6. Беляев А.Е., Басанец В.В., Болтовец Н.С., Зоренко А.В., Капитанчук Л.М., Кладько В.П., Конакова Р.В., Колесник Н.В., Коростинская Т.В., Крицкая Т.В., Кудрик Я.Я., Кучук А.В., Миленин В.В., Атаубаева А.Б. Влияние перегрева p - n -перехода на деградацию мощных импульсных кремниевых лавинно-пролетных диодов//ФТП. – 2011. – Т. 45, Вып. 2. – С. 256-262.
7. Резников В., Губырин Л. Высокочастотные и СВЧ pin -диоды//Компоненты и технологии. – 2000. – № 3. – С. 42-43.
8. Явид В.Ю., Челябинский А.Р. Центры рекомбинации в облученном гамма квантами 60Co p - Ge // Мат. 4-й международной конференции “Взаимодействие излучений с твердым телом”, Минск, Беларусь. –2001. – С. 232-233.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kushnirenko V.V., Ninidze G.K., Pavlyuk S.P., Savitskiy S.M., Tretyak O.V. Vozdeystviye impulsov pryamogo toka na vremya zhizni neosnovnykh nositeley zaryada v p - n -diode//ТКЭА. – 2007. – № 1. – С. 32-35.
2. Andriyevskiy V.F., Gorelenok A.T., Zagorelskaya N.A., Kamanin A.V., Shmidt N.M. Kontsentratsionnyye profili osnovnykh i effektivnogo vremeni zhizni neosnovnykh nositeley zaryada v getterirovannom GaAs//Pisma v ZhTF. – 2001. – Т. 27, Вып. 23. – С. 67-72.
3. Korshunov F.P., Bogatyrev Yu.V., Lastovskiy S.B., Kulgachev V.I., Anufriyev L.P., Rubtsevich I.I., Glukhmanchuk V.V., Golubev N.F. Radiatsi-

- onno-termicheskaya obrabotka moshchnykh kremniyevykh diodov//FTT. – 2005. – № 1. – S. 419-422.
4. Gurtov V.A., Artamonov O.N., Vetrov A.S. Tverdotelnaya elektronika. – M.:, 2005. – 492 s.
 5. Chistyakov Yu.D., Dostanko A.P., Baranov V.V. Metody issledovaniya inzhektionsnykh svoystv nevypryamlyayushchikh kontaktov//Obzory po elektronnoy tekhnike. Ser. Poluprovodnikovyye pribory. Vyp. 7. – M.: TsNII Elektronika, 1974.
 6. Belyayev A.E., Basanets V.V., Boltovets N.S., Zorenko A.V., Kapitanchuk L.M., Kladko V.P., Konakova R.V., Kolesnik N.V., Korostinskaya T.V., Kritskaya T.V., Kudrik Ya.Ya., Kuchuk A.V., Milenin V.V., Ataubayeva A.B. Vliyaniye peregrevu p-n-perekhoda na degradatsiyu moshchnykh impulsnykh kremniyevykh lavinno-proletnykh diodov//FTP. – 2011. – T. 45, Vyp. 2. – S. 256-262.
 7. Reznikov V., Gubyrin L. Vysokochastotnyye i SVCh pin-diody//Komponenty i tekhnologii. – 2000. – № 3. – S. 42-43.
 8. Yavid V.Yu., Chelyadinskiy A.R. Tsentry rekombinatsii v obluchennom gamma kvantami ^{60}Co p-Ge//Mat. 4-y mezhdunarodnoy konferentsii “Vzaimodeystviye izlucheniya s tverdyim telom”, Minsk, Belarus. –2001. – S. 232-233.