

ВЛИЯНИЕ НАКОПЛЕНИЯ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ В p^+ -СЛОЕ НА ПРОЦЕСС ВОССТАНОВЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА $p^+—n$ -ПЕРЕХОДЕ

Кардо-Сысоев А. Ф., Попова М. В., Шеметило Д. И.

Рассматривается влияние накопления неосновных носителей в сильно легированном p^+ -слое $p^+—n—n^+$ -диода на процесс восстановления напряжения на нем при смене направления протекающего через прибор тока.

Эксперименты, проведенные для диодов с различным градиентом распределения концентрации легирующей примеси в $p—n$ -переходе (dn/dx), показали, что накопление носителей в приборе существенно уменьшает скорость роста напряжения на нем на этапе выноса носителей из диода.

Численный расчет оказался в хорошем согласии с данными эксперимента при подборе только одного параметра — коэффициента инжекции $p^+—n$ -перехода, значение которого может изменяться в пределах от 1 до 0.26 для диодов с различными значениями dn/dx . В частности, при уменьшении dn/dx от $8 \cdot 10^{18}$ до $1.2 \cdot 10^{18}$ см⁻⁴ коэффициент инжекции изменяется от 0.5 до 0.26.

В [1] был обнаружен эффект быстрого восстановления обратного напряжения на высоковольтных $p^+—n—n^+$ -структурах при переключении короткого импульса прямого тока (длительностью в несколько сот наносекунд) на обратный. При этом наряду с участком быстрого переключения присутствовал так называемый «пьедестал», т. е. участок сравнительно медленного нарастания напряжения, который мог в зависимости от режима занимать до 2/3 величины напряжения переключения $U_{пер}$ и который сильно зависел от параметров импульса прямого тока, что представляло значительные неудобства при разработке схем на приборах с указанным эффектом.

Величина пьедестала складывается из падения напряжения на квазинейтральной области при протекании тока через структуру и величины падения напряжения на области объемного заряда, появляющегося в процессе рассасывания диффузионной области накопленного заряда.

Из сказанного выше очевидно, что уменьшить величину пьедестала можно за счет уменьшения напряжения на области объемного заряда и за счет уменьшения падения напряжения на нейтральной области.

Уменьшить падение напряжения на области объемного заряда удалось, используя высоковольтную $p^+—p—n—n^+$ -структуру с дополнительным p -слоем. Физические процессы в такой структуре качественно рассмотрены в [2, 3].

Основная функция дополнительного p -слоя заключалась в накоплении неосновных носителей, при этом в процессе рассасывания неосновные носители, накопившиеся в p -слое, непрерывно поступают в n -базу, замедляя восстановление области объемного заряда в ней, что и приводит к уменьшению величины пьедестала.

Для уменьшения падения напряжения на квазинейтральной области необходимо уменьшить толщину базы диодной структуры и приблизить толщину слабо легированной области к ширине области объемного заряда, образующегося при восстановлении напряжения на диоде.

Цель настоящей работы — численное моделирование процессов инжекции и рассасывания плазмы в $p—n$ -переходе с учетом эффекта накопления носителей в p -слое и сравнения данных расчетов с экспериментом.

Токовые уравнения, состоящие из дрейфовой и диффузионной составляющих и уравнения непрерывности, были сведены к единому диффузионно-дрейфовому уравнению, описывающему две диффузионные и одну дрейфовую области аналогично тому, как это делалось в [4]. Это уравнение решалось численно на ЭВМ только для n -базовой области, причем использовалось приближение квазинейтральности в ней. Процессами рекомбинации при расчетах пренебрегали, так как время жизни в экспериментальных образцах было много больше, чем характерные времена импульсов прямого и обратного токов.

Граничные условия для n -базы задавались в виде токов инжекции, выраженных через полный ток и коэффициент инжекции дырок γ_p на границе n -области с p -областью и коэффициент инжекции электронов γ_n на границе n -области с n^+ -областью.

Величина заряда, накопленного в p -области, задавалась разными значениями коэффициента γ_p . Коэффициент γ_n всегда принимался равным единице. Кроме того, было учтено уменьшение напряжения, приложенного к области, содержащей нерассосавшиеся неосновные носители, на величину падения напряжения на уже сформированной области объемного заряда.

В результате численных расчетов были получены распределения неравновесных носителей заряда в n -базе образца для различных моментов времени, а также зависимости от времени тока и напряжения.

Несмотря на то что исследованию γ посвящено большое количество работ, авторам не известны работы, в которых определялось значение коэффициента инжекции для диффузионной структуры с достаточно «размытым» и плавным p - n -переходом в сильно нестационарном состоянии. Качественно ясно, что в резко асимметричном p - n -переходе, когда степень легирования p -области n_A много больше, чем n -области n_D , γ_p близко к единице. В идеально симметричном случае $n_A = n_D$, $\gamma_p = 1/(1+b) = 0.26$, где $b = \mu_n/\mu_p$. В данной модели этот коэффициент принимается единственным подгоночным параметром, обеспечивающим наилучшее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Таким образом, совпадение расчетных и экспериментальных зависимостей позволяет косвенно оценить значение коэффициента инжекции p - n -перехода для реальной структуры.

Следует заметить, что расчет напряжения пьедестала осуществлялся только с учетом области объемного заряда, образующегося в n -базе, в то же время в симметричном p - n -переходе восстановление области объемного заряда происходит как в n -, так и в p -области. Однако в исследуемых образцах степень асимметрии была достаточно велика, т. е. $n_A > 10n_D$. Как показывают оценки, доля падения напряжения в p -слое меньше 10%.

Для изучения влияния p -слоя были изготовлены образцы диодов A и B с различными типами p -слоев. Все образцы изготавливались методом диффузии в n -кремний с исходным сопротивлением 40 Ом·см. Структуры этих образцов: $A - p^+ - n - n^+$, $B - p^+ - p - n - n^+$. Слои p^+ и n у всех приборов формировались одновременно для устранения возможных неоднородностей по глубине. Толщины слоев: 8 для n^+ - и 30 мкм для p^+ -типа. Концентрации p - и n -примесей на поверхности были равны 10^{20} см $^{-3}$.

Дополнительный p -слой в образце B был сформирован диффузией галлия из газообразного источника и имел глубину залегания 40 мкм.

Толщины высокоомных n -слоев обоих приборов были одинаковы и равны 250 мкм. Концентрация доноров в n -слое $N_d = 10^{14}$ см $^{-3}$.

Измерение градиентов p - n -переходов $C-V$ -методом дало следующие результаты: для образца $A - \text{grad} = 8.0 \cdot 10^{18}$, для $B - \text{grad} = 1.2 \cdot 10^{18}$ см $^{-4}$.

В эксперименте снимались зависимости тока и напряжения от времени при подаче на образцы импульсов тока прямой и обратной полярности. На рис. 1 приведены экспериментальные кривые этих зависимостей для образца B : a — осциллограмма зависимости тока от времени; b — осциллограмма

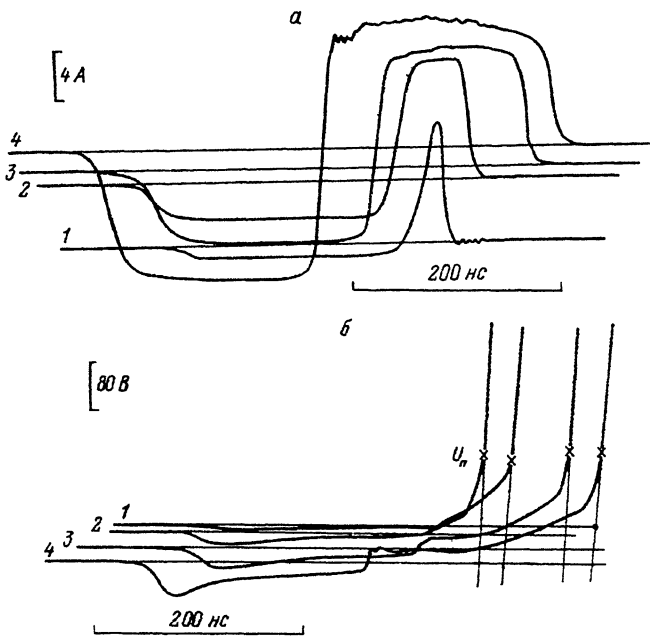


Рис. 1. Экспериментальные зависимости тока (а) и напряжения (б) от времени для образца В. а — ток. Длительность импульса прямого тока для всех кривых равна 200 нс. I^+ — величина тока пропускного направления. I^- — величина тока обратного направления. I^+ , А: 1 — 1, 2 — 3, 3 — 6, 4 — 10. I^- , А: 1, 2, 3, 4 — 10. б — напряжение пьедестала U_n , В: 1 — 112, 2 — 120, 3 — 160, 4 — 180.

зависимости напряжения от времени. По ним находились значения максимального напряжения медленного участка переключения (пьедестала). Все измерения проводились при одинаковой длительности импульса прямого тока. Амплитуда прямого тока устанавливалась 1, 3, 6, 10 А. Амплитуда обратного тока поддерживалась постоянной и равной 10 А за счет подбора ограничивающего сопротивления в цепи восстановления.

Зависимости напряжения пьедестала от тока пропускного направления приведены на рис. 2. Так как все измерения проводились при одинаковой длительности импульса прямого тока, вносимый в образец заряд был пропорционален току накачки. Потерями заряда в данном случае можно пренебречь, поскольку время жизни неосновных носителей составляло 25 мкс, что много больше времени прямого и обратного импульсов тока. Это непосредственно подтверждается равенством площадей импульсов тока на рис. 1.

Из рис. 2, на котором приведена зависимость напряжения пьедестала от величины прямого тока для различных образцов, видно, что с уменьшением градиента $p-n$ -перехода величина пьедестала значительно уменьшается. Так, для образца А при токе 10 А она составляла 480 В, а для образца В — уже 180 В, т. е. за счет введения дополнительного p -слоя

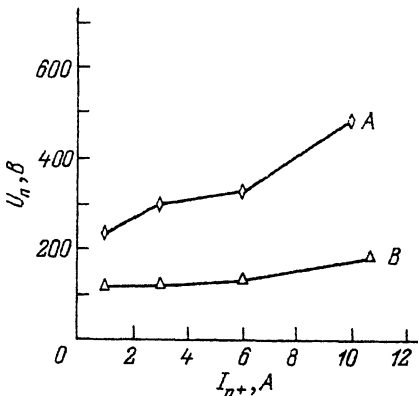


Рис. 2. Экспериментальная зависимость напряжения пьедестала от тока накачки для образцов А и В.

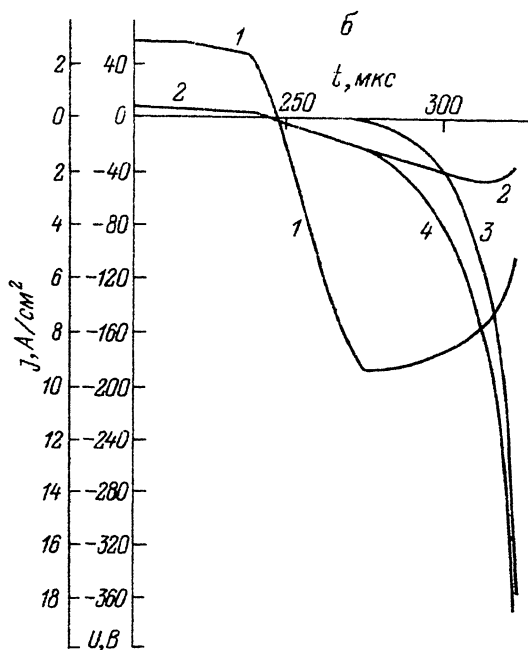
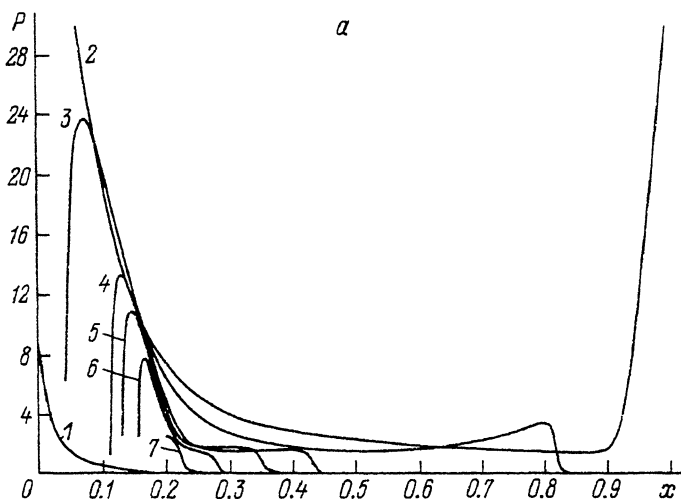


Рис. 3. Распределение концентрации дырок в базе прибора (а) расчетные зависимости тока и напряжения от времени при переключении структуры (б).

а) 1 и 2 — распределение концентрации в разные моменты времени при приложении к структуре импульса прямого тока, 3—7 — распределение концентрации в последовательные моменты времени при приложении к структуре импульса обратного тока. t , нс: 1 — 25, 2 — 242, 3 — 290, 4 — 312, 5 — 315, 6 — 320, 7 — 324. б) 1 — ток через прибор, 2 — падение напряжения на области объемного заряда, 3, 4 — суммарное падение напряжения на образце.

достигнуто уменьшение величины пьедестала в 2.6 раза. Кроме того, уменьшилась зависимость пьедестала от амплитуды прямого тока (вносимого заряда). Если для образца А при изменении прямого тока от 1 до 10 А напряжение пьедестала изменялось от 232 до 480 В, т. е. в 2.1 раза, то для образца В изменение этой величины составило уже 1.5 раза (от 116 до 180 В).

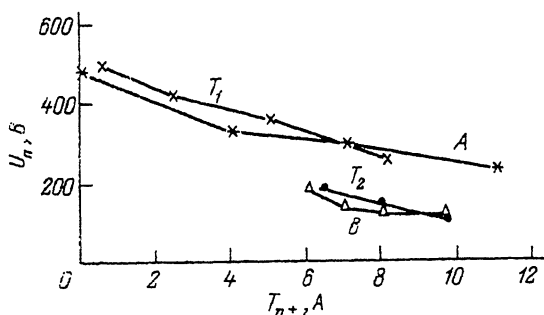


Рис. 4. Зависимость напряжения пьедестала от тока накачки.

Теоретические кривые: $T_1 - \gamma_p = 0.5$, $T_2 - \gamma_p = 0.26$. Экспериментальные кривые — для образцов А и В.

На рис. 3, а в качестве примера приведены расчетные кривые концентраций при токе накачки 3 А с коэффициентом инжекции $\gamma_p = 0.5$. Для тех же расчетных параметров на рис. 3, б показаны зависимости тока и напряжения от времени.

Нами были проведены расчеты для различных значений γ . Бралось значения $\gamma_p = 1, 0.7, 0.5, 0.38, 0.26$. Наилучшие совпадения экспериментальных результатов с расчетными были получены при значении $\gamma_p = 0.5$ для образца А и $\gamma_p = 0.26$ для образца В.

Сопоставление расчетных значений зависимостей напряжения пьедестала от тока накачки для образцов $\gamma_p = 0.5$ и 0.26 и экспериментальных значений этих параметров приведено на рис. 4. Кривая T_1 соответствует $\gamma_p = 0.5$, а кривая $T_2 - \gamma_p = 0.26$.

Видно, что с уменьшением величины параметра γ_p расчетное значение напряжения пьедестала уменьшается. Достигнутое совпадение расчетных и экспериментальных результатов можно считать удовлетворительным. Некоторое различие при промежуточных значениях можно объяснить тем, что в модели не учитывалась зависимость коэффициента инжекции от тока.

На основании совпадения расчетных зависимостей и результатов эксперимента можно сделать вывод о том, что реальный коэффициент инжекции данной структуры был близок к 0.5 для образца А и к 0.26 для образца В. Как было сказано выше, потери заряда отсутствовали, что позволяет сделать вывод о накоплении носителей в p -слое, а также о том, что время жизни неосновных носителей в p -слое не меньше длительностей импульсов прямого и обратного токов. В нашем случае это 200 нс. Это не противоречит оценке уменьшения времени жизни носителей в p -слое, вызванного оже-рекомбинацией, для расщепления примеси по функции Гаусса, которая дает следующие результаты: при поверхностной концентрации примеси примерно 10^{20} см^{-3} и глубине перехода 30 мкм на глубине 10 мкм время жизни составляет $2.0 \cdot 10^{-8} \text{ с}$, а на глубине 15 мкм — уже $3.1 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, что уже значительно больше характерных времен эксперимента. Поэтому при глубине залегания перехода 30 мкм можно сказать, что накопление в p -слое может происходить в 15-микронной области, прилегающей к p - n -переходу, где и будет находиться основная часть накопленного заряда неосновных носителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ефанов В. М., Кардо-Сысоев А. Ф., Шендерей С. В. // ПитЭЭ. 1986. № 4.
- [2] Брылевский В. И., Ефанов В. М., Кардо-Сысоев А. Ф., Смирнова И. А., Чашников И. Г., Шеметило Д. И. // Всес. отраслевой научно-технический семинар «Новые силовые полупроводниковые приборы. Проблемы качества». Саранск, 1990.

- [3] Брылевский В. И., Грехов И. В., Ефанов В. И., Кардо-Сысоев А. Ф., Чашников И. Г., Шеметило Д. И. // ЖТФ. 1988. Т. 11. В. 11. С. 2244.
- [4] Кардо-Сысоев А. Ф., Попова М. В. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 1. С. 3—11.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Получена 12.11.1991
Принята к печати 16.01.1992
