

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОФИЛЯ ЦЕНТРОВ РЕКОМБИНАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ БЫСТРО ВОССТАНАВЛИВАЮЩИХСЯ ДИОДОВ

Д.В. Падеров, В.П. Падеров, Ю.В. Горячкин

Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, paderov@mail.ru

В статье приводятся результаты физико-топологического моделирования быстро восстанавливающихся диодов. Показано, что наилучшее сочетание динамических и статических параметров получается при пиковом профиле центров рекомбинации, наложенном на постоянную концентрацию, причем положение пика должно совпадать с металлургической границей p-n-перехода.

Эволюция в области силовой преобразовательной техники, сопровождающаяся расширением частотного диапазона работы, снижением коммутационных потерь, использованием новых типов управляемых полупроводниковых приборов обусловила и соответствующее развитие в области разработки и изготовления быстро восстанавливающихся диодов (БВД).

В последние годы появился ряд новых типов БВД с оптимальным сочетанием динамических и статических параметров, сохраняющих мягкий характер обратного восстановления во всем рабочем диапазоне. БВД для IGBT модулей, равно как и для других областей применения, должны обладать, при восстановлении запирающих свойств, кроме малых значений времени обратного восстановления t_{tr} , также и небольшими значениями заряда обратного восстановления Q_{tr} , пикового тока I_{tr} и скорости спада обратного тока dI_{tr}/dt . Последнее эквивалентно требованию увеличения коэффициента мягкости S , равного отношению длительности спада (t_r) и длительности фазы нарастания (t_s) обратного тока ($S=t_r/t_s$) [1].

Целью работы являлась разработка рекомендаций по оптимальному распределению центров рекомбинации в физической структуре кристалла БВД, при котором можно получить наилучшее сочетание статических и динамических параметров, а именно, напряжение пробоя больше 1200 В, прямое падение напряжения при токе 45 А не более 2,5 В, время восстановления не более 200 нс и коэффициент мягкости характеристики больше 1.

Методом исследования в работе являлось физико-топологическое моделирование БВД в программе технологического и приборного моделирования TCAD 7.0. Научной новизной является то, что результаты моделирования показали, что заданная совокупность статических и динамических параметров может быть получена только при неоднородном профиле центров рекомбинации. Практическая значимость заключается в получении конкретного профиля центров рекомбинации для достижения заданных параметров.

Время жизни неосновных носителей τ_p является фундаментальным параметром, от которого в значительной степени зависят характеристики полупроводниковых приборов. Для получения высокого быстродействия в БВД необходимо иметь τ_p как можно меньше, тогда, как для обеспечения низких значений прямого падения напряжения U_F требуется, чтобы τ_p было как можно больше. Поэтому используется компромиссный подход к удовлетворению этих требований. Существенное влияние на «мягкость» или «жесткость» кривой обратного восстановления имеет профиль распределения времени жизни. Для достижения мягкой характеристики необходимо, чтобы τ_p в базе диода было значительно меньше у p-n перехода, чем на стороне n-n⁺ перехода [2,3].

При облучении электронами образуется постоянный профиль распределения τ_p , что приводит к жесткому восстановлению. Преимущество использования пучка протонов перед другими методами регулирования τ_p заключается в возможности контроля глубины проникновения излучения. Например, для пучка протонов с энергией 3 МэВ глубина проникновения составляет 100 мкм (при облучении электронами - она превышает 6 мм). Влияние протонов сходно с воздействием ионной имплантации, т.е. происходит резкое увеличение дефектов там, где заканчивается пробег протона. Поэтому при данной обработке нужно располагать зону с уменьшенным временем жизни в узком слое с четкими границами, что, в свою очередь, позволяет осуществлять оптимальное сочетание статических и динамических характеристик БВД [4].

На фирме Semikron, Германия, разработана технология регулирования τ_r , получившая название CAL (Controlled Axial Lifetime - аксиальное регулирование времени жизни). Профиль распределения рекомбинационных центров (РЦ), формируемый по технологии CAL, состоит из пика РЦ и плоского участка. Пик РЦ образуется за счет облучения ионами He^{++} (α -частицы), а плоский участок - диффузией золота, платины или электронным облучением, т.е. CAL технология - это комбинированный метод. Облучение ионами He^{++} вызвано тем обстоятельством, что облучение протонами, дозами больше 10^{12} см^{-2} , приводит к уменьшению величины пробивного напряжения. Оптимальное соотношение $I_{\text{тм}}-U_F$, а также более мягкая характеристика, получают-ся при более близком расположении пика РЦ к р-п переходу. При этом пик РЦ может располагаться как в р-эмиттере, так и в п базе. Положение пика РЦ регулируется энергией ионов He^{++} , а концентрация РЦ - дозой облучения [5].

БВД, изготовленные с использованием технологии CAL имеют высокую стойкость к повреждению от динамической лавины. Образование динамической лавины происходит при очень высоких значениях di/dt в условиях одновременного присутствия высокого напряжения источника питания и высокого $I_{\text{тм}}$. Ток $I_{\text{тм}}$ в базе диода увеличивает плотность дырок, которая складывается с положительным зарядом исходной донорной примеси. Это приводит к временному снижению напряжения лавинного пробоя и образованию динамической лавины и шнурованию тока. БВД, облученные ионами He^{++} , по сравнению с другими БВД, выдерживают самые высокие di/dt без разрушения (до 5000 А/мкс), т.е. имеют высокую стойкость к динамической лавине [6].

Самый высокий ток утечки при T_j макс имеют БВД с диффузией золота. Поэтому использование диффузии золота при создании БВД на напряжение 1200 В и выше нецелесообразно из-за возникающих тепловых проблем. Ток утечки в БВД, облученных ионами He^{++} больше, чем в БВД с диффузией платины или электронным облучением, но значение его недостаточно для возникновения тепловых проблем. Наименьший разброс параметров, который особенно важен при параллельной работе приборов, имеют БВД с электронным и ионным облучением [7].

Так как реальная структура быстро восстанавливающегося диода трехмерная, то была разработана квазитрехмерная модель структуры в цилиндрической системе координат [8] (рис.1).

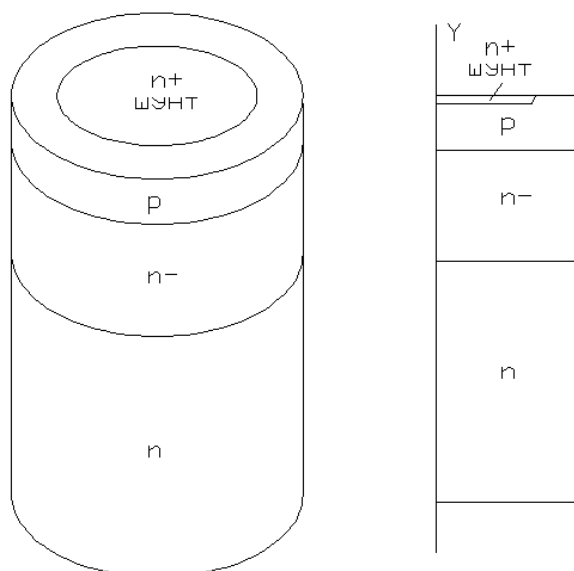


Рисунок 1- Элементарная ячейка БВД

Отношение площади поля n^+ - областей в аноде диода к площади поля р-области составляет приблизительно 0,5. Это же соотношение площади поля шунта к площади поля кристалла сохраняется и в квазитрехмерной структуре, представленной на рисунке 1. Отношение площа-

дей реальной структуры и модели равно 225000. При моделировании структуры в программе DESSIS задается данный коэффициент площади.

Обратное напряжение в этой структуре определяется длиной n^- области (рисунок 1). В данной структуре напряжение пробоя без учета краевых эффектов составляет около 1800 В. На рисунке 2 представлены зависимости времени восстановления и прямого падения напряжения от постоянной концентрации А - центров рекомбинации.

Одним только электронным облучением можно получить время восстановления менее 200 нс, но при этом прямое падение напряжения будет составлять порядка 3 В. Кроме того кривая тока восстановления будет иметь «жесткий» характер.

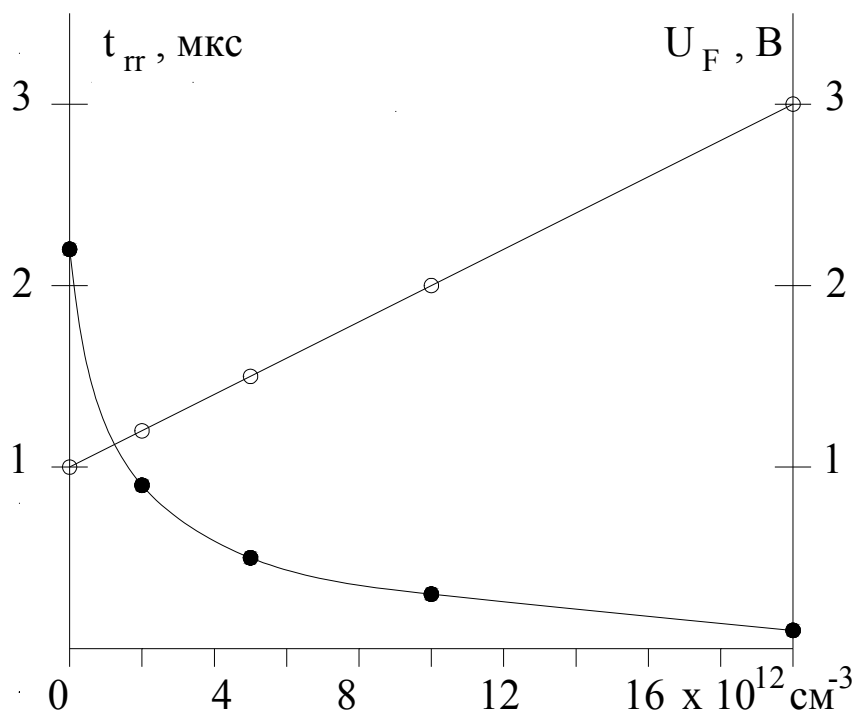


Рисунок 2 - Зависимости времени восстановления и прямого падения напряжения от постоянной концентрации А - центров рекомбинации

В ходе моделирования использовался также комбинированный профиль центров рекомбинации: гауссовский профиль, наложенный на постоянный профиль распределения А – центров. Для данного диода было установлено, что оптимальным является расположение пика вблизи металлургического перехода ($y=34 \text{ мкм}$), т.е. при таком положении пика время восстановления было минимальным. Концентрация в пике выбиралась из того, чтобы дозы электронного и протонного облучения были приблизительно равны: концентрация в максимуме $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, стандартное отклонение – 10 мкм. Исходя из таких параметров гауссовского профиля, было промоделировано совместное влияние электронного и протонного облучения на величину прямого падения напряжения и на время обратного восстановления. Эти результаты представлены на рисунках 3 и 4. На рисунке 3 представлены результаты моделирования переходного процесса. По оси x - время по оси y - обратный ток. Справа налево расположены кривые восстановления тока: 1 – без дополнительных ГЦ, 2 – гауссовский профиль + постоянный уровень А-центров с концентрацией $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, 3 - гауссовский профиль + постоянный уровень с концентрацией $7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, 4 - гауссовский профиль + постоянный уровень с концентрацией 10^{13} см^{-3} ; соответственно времена восстановления 2070, 457, 174, 140 нс. На рисунке 4 представлены результаты моделирования прямой ветви ВАХ. Слева направо расположены кривые ВАХ: 1 - без дополнительных ГЦ, 2 – гауссовский профиль + постоянный уровень А-центров с концентрацией $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, 3 - гауссовский профиль + постоянный уровень с концентрацией $7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$,

4 - гауссовский профиль + постоянный уровень с концентрацией 10^{13} см^{-3} ; соответственно падения напряжения при токе 45 А равны 1 В; 1,6 В; 2,3 В; 2,7 В.

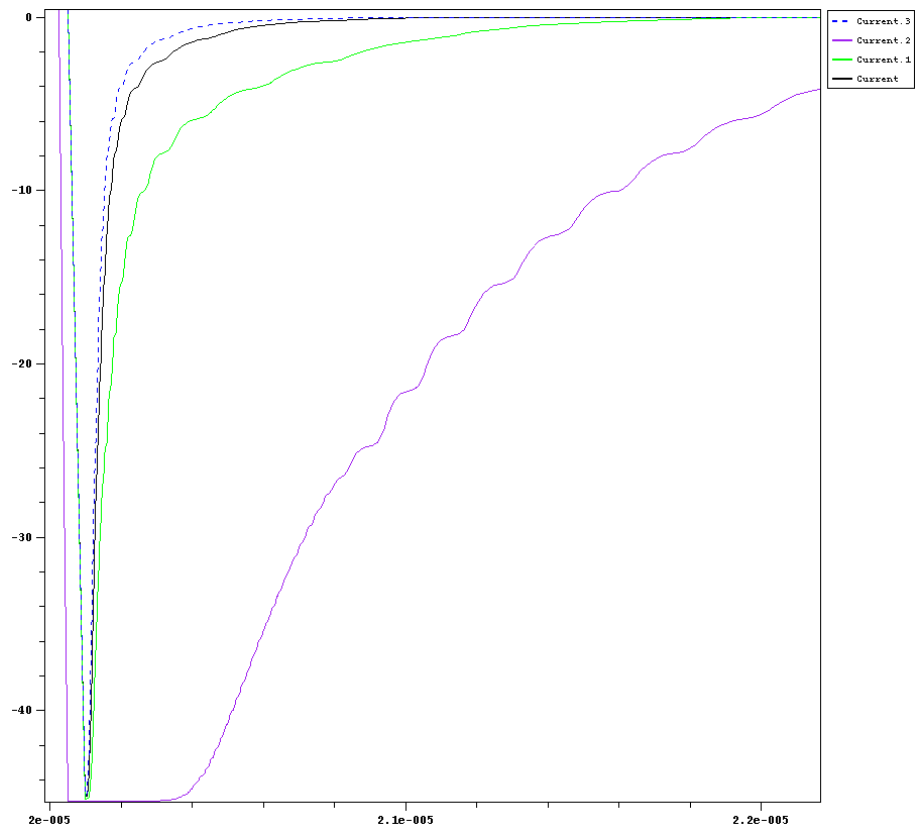


Рисунок 3 - Результаты моделирования переходного процесса

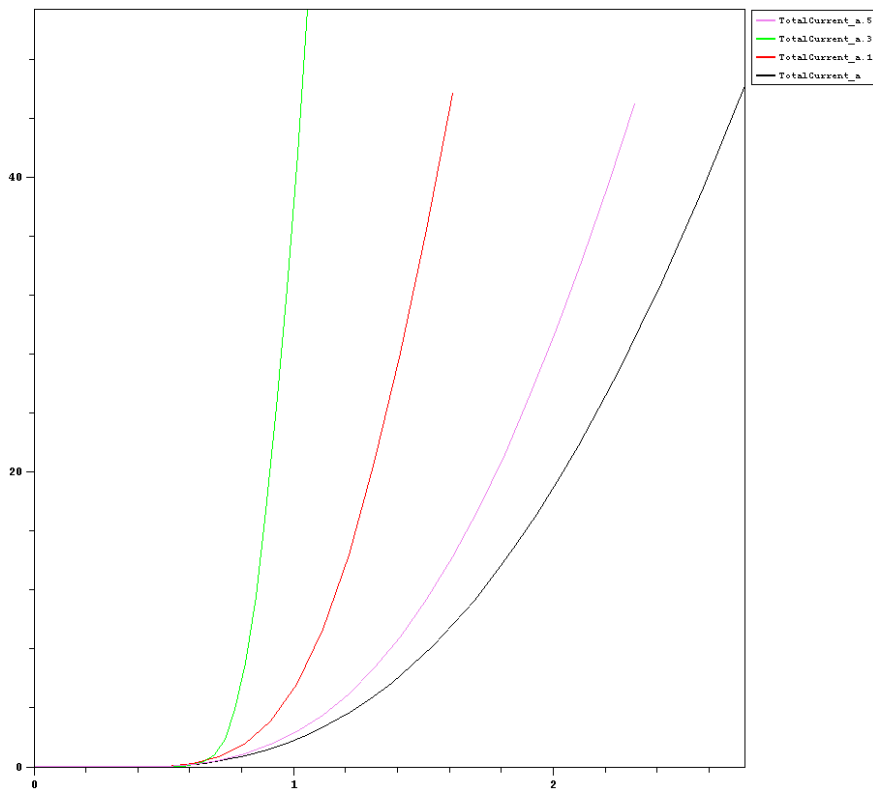


Рисунок 4 - Результаты моделирования прямой ветви ВАХ

Из анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

Нельзя добиться удовлетворительной совокупности динамических и статических параметров БВД при однородной концентрации А-центров рекомбинации, получаемых с помощью электронного облучения. При времени восстановления меньше 200 нс прямое падение напряжения при номинальном токе становится недопустимо большим. Кроме того, электронное облучение делает кривую восстановления тока «жесткой», что может негативно сказаться при выбросах напряжения на индуктивной нагрузке.

Совместное же использование электронного и протонного (или α -) облучения, уменьшая время обратного восстановления не приводит к столь существенному возрастанию прямого падения напряжения и придает характеристике восстановления более «мягкий» характер. Причем пиковую концентрацию А-центров рекомбинации следует создавать вблизи металлургического перехода. Исходя из того, что напряжение пробоя должно быть не менее 1200 В, прямое падение напряжения при токе 45 А не более 2,5 В, время восстановления не более 200 нс, можно сказать, что оптимальным будет диод с комбинированным профилем А-центров рекомбинации: постоянная концентрация - $7 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и гауссовский профиль с пиком $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, расположенным на границе $y=34 \text{ мкм}$ и стандартным отклонением 10 мкм.

-
1. Rahimo, M. T. Optimization of the reverse recovery behaviour of fast power diodes using injection efficiency and lifetime control techniques / M. T. Rahimo, N. Y. I. Shammam // Proc. EPE 97. – P. 2099.
 2. Rahimo, M. T. An improved design for ultra soft-fast recovery diodes suitable for (600-1200 V) IGBT applications / M. T. Rahimo, W. J. Findlay, L. Coulbeck // Proc. PCIM 98, p. 409.
 3. Wolley, E. D. High speed, soft recovery epitaxial diodes for power inverter circuits / E. D. Wolley, S. F. Bevacqua // IEEE IAS Meet.– 1981.– P. 797.
 4. Schlangenotto, H. Improved reverse recovery of fast power diodes having a self-adjusting p-emitter efficiency / H. Schlangenotto, J. Serafin // Proc. EPE 89. – P. 611.
 5. Schlangenotto, H. Improved reverse recovery of fast power diodes having a self-adjusting p-emitter efficiency / H. Schlangenotto, J. Serafin, F. Sawitzki // Proc. IEEE Electr.Dev.Let. – 1989. – №10. – P. 322.
 6. Brunner, H. 2D-Simulationns of the surge current and reverse recovery behaviour of the fast power diodes / H. Brunner, H. Mattausch, H. Mitlehner // Proc. IEEE Electr.Dev.Let. – 1989. – №10. – P. 372.
 7. Shimizu, Y. High speed low-loss p-n diode having a channel structure / Y. Shimizu, M. Naito, S. Murakami // IEEE Trans. on Electron Dev. V. ED-31. – 1984, – № 9. – P. 1314.
 8. Горячкин, Ю. В. Физико-топологическое моделирование в САПР TCAD: учебное пособие для вузов / Ю. В. Горячкин, С. А. Нестеров, Б. П. Сурин.- Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006.-124 с.