

БЕСКОНТАКТНОЕ ИЗМЕРЕНИЕ РЕКОМБИНАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ КРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР И ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МОДУЛЯЦИОННЫМ СВЧ МЕТОДОМ

Ю. А. Аношин, В. М. Базин, А. С. Даревский

Основной путь повышения КПД кремниевых солнечных элементов (СЭ) — устранение или минимизация различных источников рекомбинационных потерь. Прогресс в этом направлении сдерживается отсутствием методов измерения составляющих рекомбинационных потерь на различных этапах изготовления СЭ. Принципиально новые возможности экспериментального определения вкладов различных источников рекомбинационных потерь представляют бесконтактные методы электромагнитного зондирования. Однако известные ВЧ методы [1] не обладают чувствительностью, требуемой при исследовании структур СЭ, предназначенных для работы при неконцентрированном солнечном излучении, а известные СВЧ методы [2] не пригодны для измерения рекомбинационных параметров полупроводниковых структур и приборов с $p-n$ -переходами вследствие влияния барьерных емкостей и наличия сильнолегированных слоев и металлизации.

Для решения этой проблемы нами создана СВЧ установка ($f=10$ ГГц) и разработан бесконтактный СВЧ модуляционный метод измерения рекомбинационных параметров кремниевых пластин, структур типа $n^+ - p - p^+$ с субмикронными n^- - и p^+ -слоями и базовой областью с удельным сопротивлением ≥ 4 Ом·см, а также СЭ на их основе. Метод базируется на измерении стационарной и нестационарной СВЧ фотопроводимости с помощью высокодобротного цилиндрического резонатора 1 (рис. 1), колебания типа H_{012} в котором возбуждает генератор 2 на диоде Ганна. Электромагнитная связь с измеряемым полупроводниковым образцом 3 осуществляется с помощью отверстия связи 4 в горизонтальном торце резонатора. Поскольку вектор электрической компоненты зондирующего СВЧ поля в окрестности отверстия связи имеет в этом типе резонатора лишь азимутальную составляющую и направлен параллельно плоскости стенки резонатора и образца, то СВЧ токи между образцом и резонатором, а также токи через $p-n$ -переходы отсутствуют. По этим причинам СВЧ установка является оптимальной для обеспечения бесконтактных измерений и устранения влияния барьерной емкости $p-n$ -переходов на измеряемые сигналы.

Для линеаризации нелинейного дифференциального уравнения с нелинейными граничными условиями, описывающего спад фотопроводимости в широком диапазоне уровней инжекции, привлечена модуляционная методика [3], в соответствии с которой осуществляется равномерное освещение поверхности образца малоинтенсивными прямоугольными импульсами ИК светодиодов 5 ($\lambda=1.06$ мкм) и одновременно стационарная подсветка с помощью осветителя 6. При освещении образца возникает сигнал на СВЧ детекторе 7, пропорциональный изменению добротности резонатора, причем обусловленная стационарной подсветкой постоянная составляющая сигнала СВЧ детектора измеряется с помощью цифрового вольтметра 8, а переменная составляющая сигнала, связанная с импульсным ИК возбуждением, — с помощью запоминающего осциллографа 9. Поскольку диаметр отверстия связи и глубина скин-слоя намного превосходят толщины всех слоев структуры, то распределение электрической компоненты зондирующего СВЧ поля однородно. Учитывая, что изменением проводимости n^+ - и p^+ -слоев при освещении можно пренебречь вследствие их высокой темновой электропроводности и малой толщины, отметим, что сигнал СВЧ детектора пропорционален средней фотопроводимости и, следовательно, средней концентрации неравновесных носителей заряда (ННЗ) в p -базе.

Нами установлено, что при использовании модуляционной методики в случае высокоэффективных СЭ со структурой $n^+ - p - p^+$, в которых токи насыщения I_{0n^+} и I_{0p^+} легированных n^+ - и p^+ -слоев не превышают $5 \cdot 10^{-12}$ А/см², а диффузионная длина ННЗ превосходит толщину w базовой области, с учетом выражения для суммарного рекомбинационного тока [4] имеет место приближенное соотношение

$$\tau_{\text{гн}}^{-1} = -\frac{1}{\Delta n} \frac{d(\overline{\Delta n})}{dt} = [\tau^{-1} + P_0(I_{0n^+} + I_{0p^+})/qwn^2] + 2[(I_{0n^+} + I_{0p^+})/qwn^2] \bar{n}_{\text{ст}}$$

где $\bar{n}_{\text{ст}}$ — средняя стационарная концентрация ННЗ, инжектированных постоянной подсветкой; $\overline{\Delta n}$ — средняя концентрация ННЗ, связанная с импульсным фотовозбуждением

($\Delta n \ll \bar{n}_{\text{ср}}$); p_0 — равновесная концентрация дырок в базе; τ — время жизни ННЗ в p -базе зависящее от $\bar{n}_{\text{ср}}$; q — заряд электрона и n_s — собственная концентрация носителей в кремнии. Из этого соотношения следует, что при $\tau = \text{const}$ зависимость $\tau_{\text{мгн}}^{-1}(\bar{n}_{\text{ср}})$ имеет вид прямой, по тангенсу угла которой можно экспериментально определить суммарный ток $I_{0n+} + I_{0p+}$, а затем зависимость $\tau(\bar{n}_{\text{ср}})$.

На рис. 2 (кривые 1, 2) представлены типичные экспериментальные зависимости $\tau_{\text{мгн}}^{-1}(\bar{n}_{\text{ср}})$, измеренные в интервале стационарных освещенностей $F=8-260$ мВт/см² для непасивированных двухсторонних СЭ [5] с $p_0=6 \cdot 10^{14}$ см⁻³, различающихся напряжением холостого хода ($V_{\text{ХХ}}$) и КПД (η) при условии освещения АМО и 20 °С (1 — СЭ 1: $V_{\text{ХХ}}=583$ мВ, $\eta=12\%$, $w=245$ мкм; 2 — СЭ 2: $V_{\text{ХХ}}=599$ мВ, $\eta=13\%$, $w=275$ мкм). Исходя из анализа кривых 1, 2 и 3

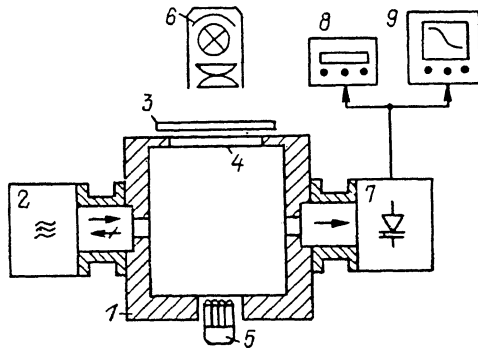


Рис. 1.

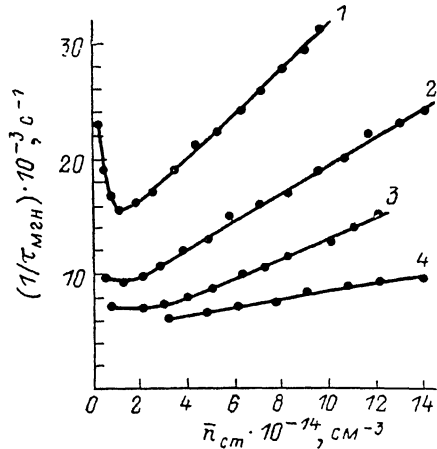


Рис. 2.

для непасивированной n^+p-n^+ -структуры, измеренной с целью разделения вкладов n^+ - и p^+ -слоев в общие рекомбинационные потери, установлено, что в случае СЭ 1 при изменении $\bar{n}_{\text{ср}}$ величина τ меняется в интервале 30—160 мкс, $I_{0p+}=1.9 \cdot 10^{-12}$ А/см² и $I_{0n+}=0.8 \times 10^{-12}$ А/см², а в случае СЭ 2 $\tau=220-280$ мкс, $I_{0p+}=1.2 \cdot 10^{-12}$ А/см² и $I_{0n+}=0.8 \cdot 10^{-12}$ А/см², т. е. более высоким значениям $V_{\text{ХХ}}$ и КПД соответствуют более низкие значения I_{0p+} и более высокие величины τ . Факт возрастания и последующего постоянства величины τ по мере роста $\bar{n}_{\text{ср}}$, соответствующий механизму рекомбинации Шокли—Рида—Холла, был независимо подтвержден модуляционным СВЧ методом после удаления металлизации и легированных слоев с обоих СЭ и последующего измерения зависимости $\tau(\bar{n}_{\text{ср}})$ в кислотном электролите, снижающем скорость поверхностной рекомбинации до сверхнизких значений [6]. Примером применимости модуляционного метода на стадии обработки технологии служит зависимость $\tau_{\text{мгн}}^{-1}(\bar{n}_{\text{ср}})$ для n^+p-n^+ -структуры с поверхностями, пассивированными SiO₂ (рис. 2, кривая 4): пассивация приводит к снижению I_{0n+} до $0.3 \cdot 10^{-12}$ А/см².

Таким образом, бесконтактный модуляционный СВЧ метод позволяет исследовать вклад составляющих рекомбинационных потерь из разных областей и на различных этапах изготовления СЭ.

Литература

- [1] Swanson R. M. // Solar Cells. 1986. Vol. 17. N 1. P. 85—118.
- [2] Ахманов В. Б., Лисюк Ю. В., Медведев Ю. В., Петров А. С. // Изв. вузов. Физика. 1983. Т. 26. № 6. С. 79—85.
- [3] Рыбкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М., 1963. 496 с.
- [4] Sinton R. A., Swanson R. M. // IEEE Trans. Electron Devices. 1987. Vol. ED-34. N 6. P. 1380—1389.
- [5] Аношин Ю. А., Бордина Н. М., Зайцева А. К. // Гелиотехника. 1983. № 1. С. 15—19.
- [6] Yablouovitch E., Allara D. L., Chang C. C. // Phys. Rev. Lett. 1986. Vol. 57. N 2. P. 249—252.

Всесоюзный научно-исследовательский
проектно-конструкторский и технологический
институт источников тока
Москва

Поступило в Редакцию
25 апреля 1988 г.