

Н. М. Богатов, М. П. Матвеекин, Р. Р. Родоманов, Н. А. Яковенко
(Краснодар)

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ
СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ДВУСТОРОННИХ СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Создана контрольно-измерительная информационная система для исследования спектральных и вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов, с помощью которой рассмотрено влияние накопления неравновесного поверхностного заряда на спектральные характеристики кремниевых двусторонних солнечных элементов с мелким несимметричным *n-p*-переходом. Показано, что потери собирания фотогенерированных носителей заряда, обусловленные этим процессом, проявляются во всей области спектральной чувствительности солнечных элементов.

Введение. Автоматизация научного эксперимента повышает точность и производительность научных исследований. Автоматизированные контрольно-измерительные системы реализуют функции управления, контроля, измерения и обработки данных. Устройства, выполняющие эти функции, создаются на основе микропроцессоров (МП). Микропроцессорные средства автоматизации измерений условно можно разделить на следующие группы [1–3]: встраиваемые МП и простейшие микроконтроллеры, универсальные микроконтроллеры и специализированные микроЭВМ, специализированные DSP-микропроцессоры, микроЭВМ и ЭВМ общего назначения, мульти-микропроцессорные системы, аппаратные средства поддержки микропроцессорных систем.

В данной работе предложена универсальная система управления измерительным и лабораторным оборудованием, основанная на цифровой обработке информации, предусматривающая многоканальный ввод данных с измерительного и лабораторного оборудования, внутреннюю обработку информации, сопряжение с персональным компьютером и внешнюю обработку информации. Эта система является, во-первых, структурной единицей в составе контрольно-измерительных информационных систем, предназначенных для исследования технических характеристик изделий, во-вторых, действующим учебным комплексом для изучения методов проектирования цифровых систем автоматизированной обработки информации и управления оборудованием. С ее помощью исследовано влияние неравновесного поверхностного заряда на коэффициент собирания двусторонних солнечных элементов.

1. **Автоматизированная система управления измерительным оборудованием.** Основой системы управления измерительным оборудованием является программируемый контроллер для сбора и первичной обработки информации (рис. 1), посредством которого осуществляется подключение измерительной аппаратуры к персональному компьютеру IBM PC и управление исполнительными элементами приборов. На программируемый контроллер возлагаются задачи сбора и первичной обработки данных. Более детальная и сложная обработка данных выполняется на ЭВМ, обладающих развитыми операционными системами, языками программирования высокого уровня, редакторами, различными прикладными программами, магнитными и лазерными накопителями большой емкости.

Основной модуль программируемого контроллера – это плата процессора, представляющая собой микроЭВМ. Режимы работы портов программируемого параллельного интерфейса должны быть заданы в программе пользователя. К портам ввода-вывода подключаются платы сопряжения с различными устройствами (цифровыми приборами, блоком управления шаговым двигателем, цифроаналоговыми преобразователями, аналого-цифровыми преобразователями и т. д.).

Персональный компьютер и программируемый контроллер с помощью программы обмениваются данными между собой. Подготовленная на IBM PC программа пересылается в программируемый контроллер, и он управляет экспериментом автономно. В ходе эксперимента полученные данные пересылаются в IBM PC для дальнейшей математической обработки. Использование программируемого контроллера сбора и первичной обработки информации упрощает процессы подготовки и проведения экспериментов, так как не требуется разрабатывать дополнительные технические и программные средства под каждый конкретный эксперимент.

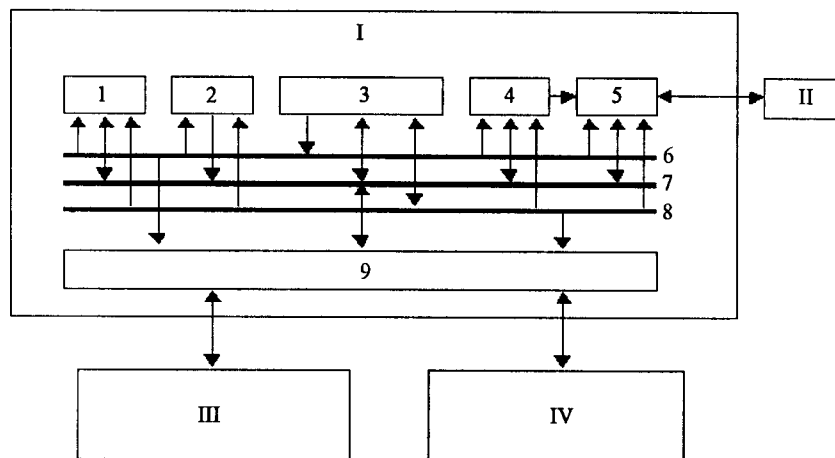


Рис. 1. Структурная схема программируемого контроллера сбора и первичной обработки информации: I – плата процессора; II – персональный компьютер IBM PC; III – плата сопряжения с цифровыми приборами; IV – блок сопряжения с шаговым двигателем и цифроаналоговым преобразователем; 1 – оперативное запоминающее устройство; 2 – постоянное запоминающее устройство; 3 – блок центрального процессора; 4 – программируемый таймер; 5 – последовательный интерфейс; 6 – шина адреса; 7 – шина данных; 8 – шина управления; 9 – программируемый параллельный интерфейс

В зависимости от сложности задачи, изменяя структуру функциональных модулей и программу, можно обеспечить возможность работы программируемого контроллера для различного количества входных–выходных дискретных и аналоговых сигналов. Архитектура устройства допускает увеличение быстродействия, объема памяти, разрядности, числа каналов обмена информацией. Конкретные параметры определяются задачами эксперимента.

Программируемый контроллер сбора и первичной обработки информации относится к группе аппаратных средств поддержки микропроцессорных систем. Он расширяет функциональные возможности персонального компьютера, связанные с процессами контроля, измерения, обработки данных и управления лабораторным оборудованием. В отличие от специализированных плат, подсоединяемых к общей шине персонального компьютера, программируемый контроллер осуществляет взаимодействие с IBM PC через порт ввода–вывода и может работать на достаточно большом расстоянии, что повышает гибкость и универсальность системы.

2. Автоматизация измерений параметров полупроводниковых приборов. С использованием программируемого контроллера сбора и первичной обработки информации создана контрольно-измерительная информационная система для исследования спектральных и вольт-амперных характеристик полупроводниковых приборов, влияния на эти характеристики технологических условий, внешних воздействий и других факторов, а также для применения в качестве учебно-лабораторного оборудования. Система включает универсальный измерительный спектральный комплекс и установку измерения вольт-амперных характеристик нелинейных элементов.

Для этой системы программируемый контроллер собран на основе 8-разрядного микропроцессора Z80, постоянное запоминающее устройство имеет емкость 8 Кбайт, оперативное запоминающее устройство – 4 Кбайт, периферийный параллельный интерфейс состоит из четырех больших интегральных микросхем KP580BB55, имеющих двенадцать 8-разрядных портов ввода–вывода. Конструктивно он выполнен в виде функционально законченных модулей, размещенных в общем корпусе.

В состав универсального измерительного спектрального комплекса входит светосильный монохроматор МДР-23, предназначенный для работы в диапазоне 200–2000 нм. В этом комплексе программируемый контроллер управляет работой шагового двигателя монохроматора и регистрирует спектр, снимая значение сигнала с универсального цифрового вольтметра, к которому подключен фотоприемник. Кроме того, программируемый контроллер выполняет основные функции по первичной математической обработке данных. Накопление больших объемов данных и дополнительную обработку информации обеспечивает IBM PC, соединенный с программируемым контроллером через стандартный порт RS232.

Универсальный измерительный спектральный комплекс предназначен для регистрации в однолучевом режиме спектров различных источников оптического излучения, спектров пропускания и отражения (при наличии специальной приставки) твердых и жидких тел в диапазоне от 200 до 1200 нм. Источником излучения служит галогенная лампа накаливания мощностью 200 Вт, а фотоприемником – фотоумножители 200–800 и 600–1200 нм. Комплекс используется также для измерения спектральной чувствительности солнечных элементов. При этом вместо выходного сигнала фотоумножителя ре-

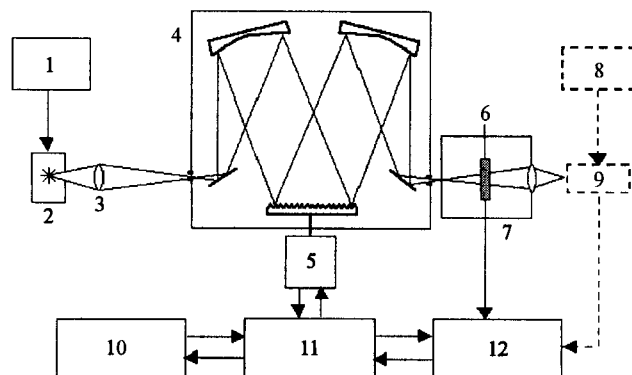


Рис. 2. Функциональная схема универсального измерительного спектрального комплекса: 1 – стабилизированный источник питания осветителя; 2 – источник излучения; 3 – кварцевый конденсор; 4 – монохроматор МДР-23; 5 – шаговый двигатель монохроматора; 6 – объект исследования; 7 – кюветная камера; 8 – высоковольтный источник питания фотоумножителя; 9 – фотоприемник излучения; 10 – персональный компьютер IBM PC; 11 – программируемый контроллер сбора и первичной обработки информации; 12 – универсальный цифровой вольтметр

гистрируется ток короткого замыкания солнечного элемента. Функциональная схема комплекса показана на рис. 2.

Разработанное программное обеспечение позволяет полностью автоматизировать спектральные измерения. Можно задавать начало и конец спектрального диапазона сканирования, шаг сканирования, число отсчетов в точке, отношение сигнал/шум, число повторов сканирования. Комплекс также позволяет проводить как абсолютные, так и относительные измерения (т. е. автоматически нормировать на эталонный спектр); учитывать нестабильность светового потока, измеряя ток осветителя, и другое. Вся снимаемая информация отображается в реальном масштабе времени в цифровом и графическом виде на экране монитора. Полученные данные сохраняются в формате xls и могут далее обрабатываться с помощью любого табличного процессора. Доступ пользователей к этим результатам обеспечивается посредством локальной компьютерной сети.

В составе установки измерения вольт-амперных характеристик нелинейных элементов программируемый контроллер с помощью цифроаналогового преобразователя в заданном диапазоне напряжений и с заданным шагом устанавливает напряжение мощного источника питания, включенного в цепь нелинейного элемента. Ток в цепи с нелинейным элементом и падение напряжения на нем автоматически измеряются двумя универсальными цифровыми приборами. Полученные данные для дальнейшей обработки передаются в IBM PC. Для измерения световых вольт-амперных характеристик солнечного элемента используется осветитель из четырех ламп накаливания мощностью по 500 Вт с цветовой температурой 2850 К и водяным фильтром для отсеивания теплового инфракрасного излучения ламп. Мощность светового потока измеряется с помощью эталонного солнечного элемента и регулируется перемещением ламп. Схема установки приведена на рис. 3.

3. Исследование спектральных характеристик двусторонних солнечных элементов. Спектральная чувствительность солнечного элемента (зависимость тока короткого замыкания от длины волны падающего на по-

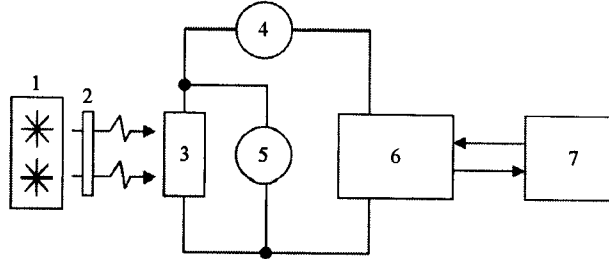


Рис. 3. Функциональная схема установки для измерения вольт-амперных характеристик: 1 – осветитель; 2 – тепловой фильтр; 3 – нелинейный элемент; 4, 5 – цифровые универсальные приборы; 6 – программируемый контроллер сбора и первичной обработки информации; 7 – персональный компьютер IBM PC

верхность оптического излучения, рассчитанная на единицу мощности излучения) – одна из основных его характеристик, на основании которой оценивается эффективность использования излучения.

Исследовались двусторонние кремниевые солнечные элементы со структурой $n^+ - p - p^+$ или $p^+ - n - n^+$ -типа, мелким диффузионным $n-p$ -переходом, текстурированной поверхностью, на которую наносилось пассивирующее просветляющее покрытие SiO_2 . Спектральная чувствительность $J_f(\lambda)$ и $J_b(\lambda)$ измерялась при освещении со стороны $n-p$ -перехода (лицо) и со стороны изотипного перехода (тыл) соответственно. Измерения проводились на универсальном измерительном спектральном комплексе по стандартной методике с низким уровнем освещенности [4]. Экспериментальные коэффициенты сбора $Q_f(\lambda)$ и $Q_b(\lambda)$ вычислялись по формуле

$$Q(\lambda) = \frac{I_{SC}(\lambda)hc}{P(\lambda)q\lambda}, \quad (1)$$

где λ – длина волны; I_{SC} – ток короткого замыкания; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме; P – мощность падающего на солнечный элемент излучения с выхода монохроматора; q – элементарный заряд.

Предлагаемый метод обработки экспериментальных спектральных характеристик двусторонних солнечных элементов отличается от методов [4–6] учетом накопления неравновесного заряда на внешней поверхности тонкого эмиттера и падения напряжения на $n-p$ -переходе, индуцированного этим зарядом [7].

При низких уровнях освещенности из двухэкспоненциальной модели вольт-амперной характеристики [4] следует формула

$$i_{SC} = \left(i_{ph} - i_0 \frac{qV_s}{kT} - i_r \frac{qV_s}{akT} - \frac{V_s}{SR_{sh}} \right) \left(1 + i_0 \frac{qSR_s}{kT} + i_r \frac{qSR_s}{akT} + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где i_{SC} – плотность тока короткого замыкания; i_{ph} – плотность фототока; i_0 – плотность диффузионного тока насыщения; V_s – падение напряжения на $n-p$ -переходе, индуцированное неравновесным поверхностным зарядом; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; i_r – плотность рекомбинационного тока насыщения; a – коэффициент неидеальности $n-p$ -перехода;

S – площадь освещаемого участка солнечного элемента; R_s – сосредоточенное последовательное сопротивление этого участка; R_{sh} – шунтирующее сопротивление этого участка. Формула (2) применима, если

$$\frac{qV_s}{kT} \ll 1 \quad \text{или} \quad i_0 \exp\left\{\frac{qV_s}{kT}\right\} \ll \frac{V_s}{SR_{sh}}, \quad i_r \exp\left\{\frac{qV_s}{akT}\right\} \ll \frac{V_s}{SR_{sh}}. \quad (3)$$

В линейном приближении по плотности тока

$$V_s = \frac{(W_e + W_{n-p})}{\epsilon\epsilon_0} \Delta Q_s, \quad \Delta Q_s = \tau_s \gamma q N_{SF} i_{SC}, \quad (4)$$

где $W_e + W_{n-p}$ – суммарная толщина эмиттера и области пространственного заряда $n-p$ -перехода; ϵ – диэлектрическая проницаемость; ϵ_0 – электрическая постоянная; ΔQ_s – плотность неравновесного поверхностного заряда; τ_s – эффективное время жизни носителей заряда, захваченных на поверхностные уровни; γ – коэффициент захвата; N_{SF} – полная плотность поверхностных состояний, способных обмениваться зарядом.

Подставим (4) в (2) и выразим i_{SC} в явном виде:

$$i_{SC} = i_{ph} \left[1 + i_0 \frac{qSR_s}{kT} + i_r \frac{qSR_s}{akT} + \frac{R_s}{R_{sh}} + \left(i_0 \frac{q}{kT} + i_r \frac{q}{akT} + \frac{1}{SR_{sh}} \right) \frac{(W_e + W_{n-p})}{\epsilon\epsilon_0} \tau_s \gamma q N_{SF} \right]^{-1}. \quad (5)$$

Из (5), используя классические выражения для i_{ph} [4–6, 8], получим модифицированные формулы для коэффициента сбора из базы при освещении с лицевой Q_f и тыльной Q_b поверхностей:

$$Q_f = \left[\frac{-\alpha b L + \frac{\left(\alpha b - \frac{1}{L'_s} \right) e^{-\alpha b W} + \left(\frac{1}{L} \operatorname{sh} \frac{W}{L} + \frac{1}{L'_s} \operatorname{ch} \frac{W}{L} \right)}{\left(\frac{1}{L} \operatorname{ch} \frac{W}{L} + \frac{1}{L'_s} \operatorname{sh} \frac{W}{L} \right)}}{e^{-\alpha b W} \alpha b L (1 - R_f) K} \right] \frac{1}{1 - \alpha^2 b^2 L^2}, \quad (6)$$

$$Q_b = \left[\frac{\alpha b L - \frac{\left(\alpha b + \frac{1}{L'_s} \right) e^{\alpha b W} - \left(\frac{1}{L} \operatorname{sh} \frac{W}{L} + \frac{1}{L'_s} \operatorname{ch} \frac{W}{L} \right)}{\left(\frac{1}{L} \operatorname{ch} \frac{W}{L} + \frac{1}{L'_s} \operatorname{sh} \frac{W}{L} \right)}}{e^{-\alpha b (W + W_i)} \alpha b L (1 - R_b) K} \right] \frac{1}{1 - \alpha^2 b^2 L^2}, \quad (7)$$

где α – коэффициент межзонного поглощения света; b – эффективное увеличение светового пути в элементе вследствие текстурирования поверхности; L – диффузионная длина неосновных носителей заряда в базе; L'_s – эффективная диффузионная длина, характеризующая скорость рекомбинации на изотипном переходе; W – толщина базы; W_i – толщина изотипного слоя; R_f, R_b –

коэффициенты отражения света от лицевой и тыльной поверхностей соответственно;

$$K = \left[1 + i_0 \frac{qSR_s}{kT} + i_r \frac{qSR_s}{akT} + \frac{R_s}{R_{sh}} + \left(i_0 \frac{q}{kT} + i_r \frac{q}{akT} + \frac{1}{SR_{sh}} \right) \frac{(W_e + W_{n-p})}{\epsilon\epsilon_0} \tau_s \gamma q N_{SF} \right]^{-1} \quad (8)$$

Эффективная скорость поверхностной рекомбинации на изотипном переходе пренебрежимо мала [8], так что $1/L'_s \ll 1/L$, и формулы (6), (7) упрощаются.

Коэффициент K характеризует потери, обусловленные накоплением неравновесного поверхностного заряда. Чтобы исключить влияние этого процесса, перейдем к отношению Q_f/Q_b :

$$DQ(\lambda, L, b) = \frac{Q_f}{Q_b} = \frac{\left[\operatorname{sh} \frac{W_p}{L} + \alpha(\lambda)bL \left(e^{-\alpha(\lambda)bW_p} - \operatorname{ch} \frac{W_p}{L} \right) \right] e^{-\alpha(\lambda)bW_{n^*}} (1 - R_f(\lambda))}{\left[\operatorname{sh} \frac{W_p}{L} + \alpha(\lambda)bL \left(\operatorname{ch} \frac{W_p}{L} - e^{\alpha(\lambda)bW_p} \right) \right] e^{-\alpha(\lambda)b(W_p + W_{p^*})} (1 - R_b(\lambda))} \quad (9)$$

Экспериментальная зависимость Q_f/Q_b от длины волны λ для каждого солнечного элемента аппроксимировалась теоретической зависимостью (9). Неизвестными параметрами в формуле (9) являются диффузионная длина неосновных носителей заряда L и эффективное увеличение b светового пути в элементе, их значения определялись методом наименьших квадратов в результате минимизации выражения

$$D\chi(L, b) = \sum_{\lambda} [DQ(\lambda, L, b) - Q_f(\lambda)/Q_b(\lambda)]^2, \quad (10)$$

где $\lambda = 800, 850, \dots, 1000$ мкм. Диапазон длин волн в (10) выбран так, чтобы основная доля излучения поглощалась в базовой области за один проход. В расчетах использовались табличные значения α [9], измеренные R_f , R_b , заданные параметры конструкции солнечного элемента W , W_e , W_i .

Подставив в левую часть (6) экспериментальные значения $Q_f(\lambda)$, найдем $K(\lambda)$ при $\lambda = 800, 850, \dots, 1000$ мкм:

$$K(\lambda) = \frac{Q_f(\lambda)}{\left[\operatorname{th} \frac{W}{L} + \alpha(\lambda)bL \left(\frac{e^{-\alpha(\lambda)bW}}{\operatorname{ch} \frac{W}{L}} - 1 \right) \right] \frac{e^{-\alpha b W_e} \alpha(\lambda)bL(1 - R_f)}{1 - (\alpha(\lambda)b)^2 L^2}} \quad (11)$$

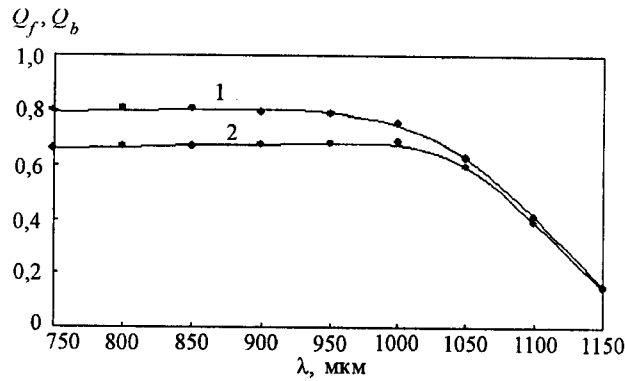


Рис. 4. Коэффициенты сбора двустороннего солнечного элемента (точки – экспериментальные данные, сплошные линии – интерполяционные кривые): 1 – Q_f ; 2 – Q_b

Для каждого солнечного элемента $K(\lambda) \approx \text{const}$, что согласуется с теоретической формулой (8).

Теоретические зависимости (6), (7) при найденных значениях L , b , K совпадают с экспериментальными данными Q_{f_e} , Q_{b_e} в пределах погрешности измерений 5 %, что проиллюстрировано рис. 4.

Для большинства исследованных солнечных элементов $L > W \approx 400$ мкм. В диапазоне $\lambda \in [750, 1000]$ мкм $b \approx 1,2$. При $\lambda \in [1050, 1150]$ мкм коэффициент поглощения уменьшается так, что $\alpha W < 1$. В этом случае текстурированная поверхность обеспечивает неоднократный проход инфракрасного излучения между поверхностями пластины, в результате коэффициент b возрастает при малых α до $b(\lambda = 1150 \text{ мкм}) \approx 1300$.

Величина потерь тока короткого замыкания вследствие накопления неравновесного поверхностного заряда выражается соотношениями

$$P_Q = (1 - K_s) 100 \% ; \quad \frac{1}{K_s} = \frac{1}{K} - \left(i_0 \frac{qSR_s}{kT} + i_r \frac{qSR_s}{akT} + \frac{R_s}{R_{sh}} \right). \quad (12)$$

Для рассмотренных солнечных элементов $9 \% \leq P_Q \leq 19,7 \%$. На уменьшение этих потерь влияют состав пассивирующего просветляющего покрытия и дополнительная термообработка в специально подобранной атмосфере.

Исследования световых и темновых вольт-амперных характеристик солнечных элементов, зависимости тока короткого замыкания от интенсивности освещения позволяют определить основные параметры, входящие в формулы (5), (8). Для анализируемых структур среднее значение полной плотности поверхностных состояний, способных обмениваться зарядом, $N_{SF} \sim 10^{14} \text{ м}^{-2}$, а величина $1/(\tau_s \gamma)$, характеризующая скорость накопления неравновесного поверхностного заряда, имеет порядок $10^{-1} - 10^{-2}$.

Заключение. С целью повышения точности и производительности исследований спектральных и вольт-амперных характеристик солнечных элементов создана универсальная система управления измерительным и лабораторным оборудованием. Функции сбора и первичной обработки информации выполняет программируемый контроллер, посредством которого осуществляется подключение измерительной аппаратуры к персональному компьютеру IBM PC и управление исполнительными элементами приборов.

Предложен метод обработки спектральных характеристик кремниевых двусторонних солнечных элементов, учитывающий накопление неравновесного заряда на внешней поверхности тонкого эмиттера и падение напряжения на n - p -переходе, индуцированное этим зарядом.

В теории фотоэлектрических структур [4, 8] влияние поверхности на коэффициент собирания учитывают, вводя эффективную скорость поверхностной рекомбинации неосновных носителей заряда. Скорость рекомбинации на освещенной поверхности влияет на потери коэффициента собирания только в коротковолновой области спектра. Метод анализа фоточувствительности двусторонних фотоэлектрических преобразователей, предложенный в работах [5, 6], учитывает эффективную скорость поверхностной рекомбинации на изотипном переходе.

Для исследованных в данной работе образцов характерна сублинейная зависимость тока короткого замыкания от интенсивности излучения. Теоретические модели [4–6, 8] не объясняют этот факт, а рассчитанные с их помощью коэффициенты собирания не согласуются с экспериментальными данными. Поэтому рассмотрен дополнительный механизм потерь собирания фотогенерированных электронов и дырок, обусловленный накоплением неравновесного заряда на поверхности тонкого эмиттера. Эти потери определяются величиной P_Q (12) и для исследуемых структур лежат в пределах $9\% \leq P_Q \leq 19,7\%$. В отличие от потерь вследствие поверхностной рекомбинации вклад рассматриваемого механизма не зависит от длины волны, так как теоретические и экспериментальные значения коэффициента K (8), (11) постоянны для каждого солнечного элемента. Измерения спектральной чувствительности проводились при низком уровне освещенности, поэтому найденные значения P_Q соответствуют нижней границе потерь тока короткого замыкания вследствие накопления неравновесного поверхностного заряда.

Неравновесный поверхностный заряд захватывается энергетическими уровнями, лежащими около уровня Ферми основных носителей в интервале kT . Комплексные исследования спектральных и вольт-амперных характеристик двусторонних солнечных элементов позволили оценить параметры этого процесса и найти значение спектральной плотности поверхностных состояний в окрестности уровня Ферми: $N_{SF_e} = qN_{SF} / kT \sim 4 \cdot 10^{15} \text{ эВ}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$.

Авторы выражают благодарность директору НПФ «Кварк» М. Б. Заксу и ведущему технологу А. М. Ситникову за предоставленные для исследований образцы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хвоц С. Т., Варлинский Н. Н., Попов Е. А. Микропроцессоры и микроЭВМ в системах автоматического управления. Справочник. Л.: Машиностроение, 1987.
2. Корнеев В. В., Киселев А. В. Современные микропроцессоры. М.: Нолидж, 1998.
3. Смит Дж. Сопряжение компьютеров с внешними устройствами. Уроки реализации. М.: Мир, 2000.
4. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов. М.: Наука, 1985.
5. Аношин Ю. А., Бордина Н. М., Зайцева А. К. Зависимость фоточувствительности фотопреобразователя с $n^+ - p - p^+$ -структурой при освещении со стороны изотипного перехода от параметров p^+ -слоя // Гелиотехника. 1983. № 1. С. 15.

6. Аношин Ю. А., Базин В. М., Даревский А. С. Измерение диффузионной длины неосновных носителей заряда в базовой области и скорости рекомбинации на изотипном переходе высокоэффективных тонкобазных кремниевых фотопреобразователей с двухсторонней чувствительностью методом двух толщин // Гелиотехника. 1990. № 3. С. 31.
7. Богатов Н. М., Матвеекин М. П., Родоманов Р. Р. Влияние поверхностных состояний на область пространственного заряда фотоэлектрических структур / Кубан. гос. ун-т. Краснодар, 2002. 20 с. Деп. в ВИНТИ 31.10.2002, № 1877-В2002.
8. Фаренбрух А., Бьюб Р. Солнечные элементы: Теория и эксперимент. М.: Энергоатомиздат. 1987.
9. Гавриленко В. И., Грехов А. М., Корбутяк Д. В., Литовченко В. Г. Оптические свойства полупроводников. Справочник. Киев: Наук. думка, 1987.

*Кубанский государственный университет,
E-mail: bogatov@phys.kubsu.ru*

*Поступила в редакцию
4 марта 2003 г.*

Подписка на наш журнал – залог Вашего успеха!