

СПЕКТР ФОТО-ЭДС В СИСТЕМЕ КРЕМНИЙ — ЭЛЕКТРОЛИТ ПРИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Электрическая поляризация системы полупроводник — электролит позволяет варьировать высоту поверхностного потенциального барьера в полупроводнике. При этом могут изменяться баланс механизмов рекомбинации на поверхности и в области пространственного заряда (ОПЗ), вероятность захвата носителей заряда на поверхностные электронные состояния (ПЭС) и, следовательно, условия формирования поверхностной фото-ЭДС. Следует ожидать, что внешнее электрическое смещение (поляризация) в системе полупроводник — электролит будет оказывать заметное влияние не только на величину, но и на спектральное распределение фото-ЭДС, так как высота поверхностного потенциального барьера, скорость рекомбинации в ОПЗ и на поверхности, а также коэффициент поверхностного захвата являются основными факторами, задающими вид спектра фото-ЭДС [1].

В настоящей работе экспериментально исследовано влияние внешней электрической поляризации на формирование фото-ЭДС в системе полупроводник — электролит. Эксперименты выполнены на образцах кремния *p*-типа ($4 \times 15 \times 3$ мм³), уровень легирования материала $\sim 6 \cdot 10^{15}$ см⁻³. После обработки (шлифовка, химическое травление в полирующем травителе типа СР-4, кипячение в аммиачно-перекисной смеси) образцы промывались в дистиллированной воде и высушивались. Образцы снабжались контактом на участке поверхности, который не погружался в электролит при измерении фото-ЭДС; тыльная и боковые поверхности образцов защищались химически стойким лаком. Для возбуждения фото-ЭДС использовалось монохроматическое излучение галогеновой лампы накаливания, модулированное с частотой 180 Гц, диапазон длин волн λ от 0,45 до 1,20 мкм. Электролит имел состав $\text{NH}_4\text{Cl} : \text{H}_2\text{O} = 5 : 95$. Фото-ЭДС измерялась с помощью селективного микровольтметра как разность потенциалов между контактом к образцу и электродом сравнения, внешнее электрическое смещение подавалось между образцом и электродом поляризации аналогично [2, 3]. Экспериментальные спектры фото-ЭДС во всем диапазоне длин волн приводились к постоянному потоку квантов, поглощаемых в образце. Учет спектрального распределения мощности источника возбуждения показал, что во всем диапазоне λ относительный уровень возбуждения для основных носителей заряда ограничивается в пределах $2 \cdot 10^{-3} \div 4 \cdot 10^{-6}$, что соответствует случаю низкого уровня возбуждения.

На рис. 1 показаны характерные для исследуемой группы образцов экспериментальные зависимости фото-ЭДС U в системе *p*—Si — электролит от напряжения катодной поляризации U_p при различных длинах волн возбуждающего света. Величина U_p измерялась как постоянная со-

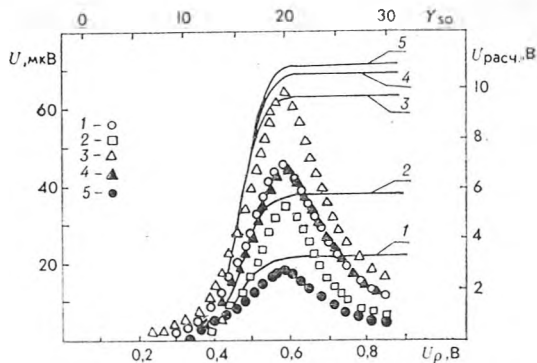


Рис. 1. Зависимости фото-ЭДС от напряжения катодной поляризации U (U_p) и поверхностного изгиба зон U (Y_{so}) при разных длинах волн возбуждающего света:

1 — $\lambda = 1,00$ мкм; 2 — $\lambda = 0,90$ мкм; 3 — $\lambda = 0,70$ мкм;
4 — $\lambda = 0,56$ мкм; 5 — $\lambda = 0,50$ мкм. Сплошные линии соответствуют расчетным зависимостям $U(U_p)$

ставляющая разности потенциалов между контактом к образцу и электродом сравнения. С повышением U_p от 0 до 0,6 В наблюдается заметное возрастание фото-ЭДС, а дальнейшее увеличение U_p до 0,85 В сопровождается ее спадом. Необходимо отметить, что при всех длинах волн возбуждающего света максимальное значение фото-ЭДС достигается при $U_p \sim 0,6$ В.

Полученную зависимость $U(U_p)$ можно объяснить исходя из следующих представлений: увеличение катодной поляризации в условиях эксперимента приводит к росту высоты потенциального поверхностного барьера запорного типа, что, в свою очередь, уменьшает вероятность рекомбинации неравновесных носителей заряда в ОПЗ и на поверхности и способствует росту барьерной компоненты фото-ЭДС. Одновременно возможно уменьшение ловушечной фото-ЭДС, поскольку повышение потенциального барьера препятствует захвату основных носителей заряда на поверхностные ловушки. Если учесть различие в знаках барьерной и ловушечной компонент фото-ЭДС и предположить доминирующую роль барьерной компоненты, можно считать, что описанный процесс соответствует росту интегральной величины фотоотклика, измеряемой в системе полупроводник — электролит.

Спад фото-ЭДС при $U_p > 0,6$ В, по-видимому, связан с развитием пробоя в ОПЗ [2]. Такой спад возможен, когда интенсивность генерации носителей заряда полем ОПЗ становится сопоставимой или большей, чем интенсивность световой генерации. Косвенным подтверждением того, что именно развитие пробоя в ОПЗ обуславливает спад U с ростом U_p (при U_p 0,6 В), может служить отмеченный факт достижения максимального значения зависимостью $U(U_p)$ при одном и том же напряжении поляризации для всех длин волн возбуждающего света.

На рис. 1 представлены также кривые, описывающие зависимость поверхностной фото-ЭДС U от безразмерной величины изгиба зон на поверхности Y_{so} , рассчитанные нами по известной формуле для случая низкого уровня фотовозбуждения [1]. Закономерность изменения расчетных кривых качественно совпадает с данными эксперимента только при напряжениях поляризации менее 0,5 В и при достаточно больших длинах волн исследуемого диапазона λ . В остальных случаях наблюдается сильное расхождение между теорией и экспериментом.

Следует отметить, что внешняя поляризация неоднозначно влияет на величину фото-ЭДС при поверхностном и объемном возбуждении полупроводника.

Типичные экспериментальные спектры фото-ЭДС системы p -Si — электролит, снятые для одного и того же образца кремния при разных значениях напряжения катодной поляризации (рис. 2), свидетельствуют, что поляризация практически не меняет длинноволновой части спектров, где фото-ЭДС с уменьшением λ монотонно растет и достаточно хорошо в соответствии с [3, 4] описывается формулой: $U = \text{const } \alpha L_d / (1 + \alpha L_d)$. Здесь выполняется условие $\alpha^{-1} \gg L_d$ (α — коэффициент поглощения света в полупроводнике; L_d — диффузионная длина носителей заряда). На данном участке спектра величина фото-ЭДС

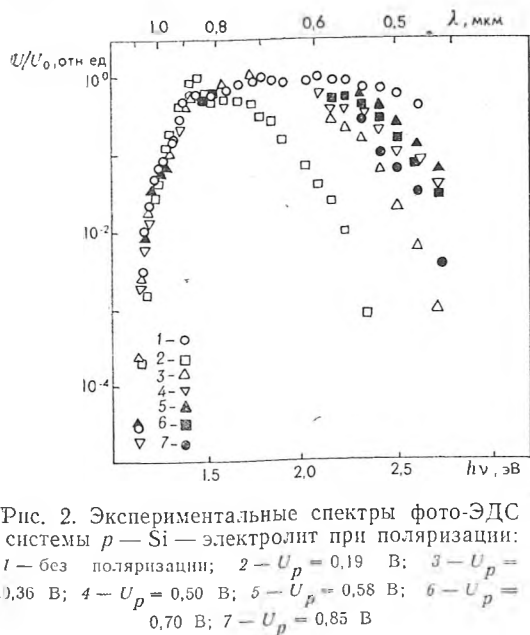


Рис. 2. Экспериментальные спектры фото-ЭДС системы p -Si — электролит при поляризации: 1 — без поляризации; 2 — $U_p = 0,19$ В; 3 — $U_p = 0,36$ В; 4 — $U_p = 0,50$ В; 5 — $U_p = 0,58$ В; 6 — $U_p = 0,70$ В; 7 — $U_p = 0,85$ В

в основном определяется объемными рекомбинационными параметрами полупроводникового материала и не зависит от режима поляризации. Это обстоятельство позволяет с достаточной степенью надежности относиться к результатам измерения L_d по спектрам фото-ЭДС в системе полупроводник — электролит, не принимая во внимание как внешние смещающие напряжения, так и неизбежное наличие потенциалов, связанных с разницей работ выхода электронов из полупроводника и металла электрода сравнения в электролите. Это тем более важно, поскольку поляризация, обусловленная такими потенциалами, может изменяться с условиями эксперимента и параметрами полупроводника.

На коротковолновом участке спектра (см. рис. 2) при уменьшении длины волны λ наблюдается четко выраженный спад фото-ЭДС, сильно зависящий от поляризации. Возрастание U_p до 0,6 В сопровождается уменьшением крутизны спада $U(h\nu)$, а также увеличением абсолютного значения фото-ЭДС при фиксированном значении λ . С повышением U_p до 0,6 В, т. е., согласно нашей трактовке, после наступления пробоя ОПЗ крутизна спада $U(h\nu)$ увеличивается при одновременном спаде абсолютного значения фото-ЭДС в случае $\lambda = \text{const}$. В интерпретации полученных результатов следует учитывать, что для рассматриваемого участка длин волн справедливо соотношение $\alpha^{-1} \ll L_d$, т. е. область генерации неравновесных носителей заряда (ННЗ) приближена к поверхности и процесс диффузии уже не оказывает определяющего влияния на формирование фото-ЭДС. Уменьшение λ в этих условиях соответствует заметному повышению объемной плотности неравновесных носителей у поверхности полупроводника, в частности в области пространственного заряда. Следствием этого является рост темпа рекомбинации неравновесных носителей как в ОПЗ, так и на поверхностных центрах, а также увеличение темпа захвата дырок на поверхностные ловушки. В целом указанные процессы приводят к перераспределению роли барьерной и ловушечной компонент фото-ЭДС и, при справедливости сделанных допущений, позволяют объяснить спад интегрального фотоотклика в системе полупроводник — электролит с уменьшением λ .

Катодная поляризация системы p — Si — электролит при малых напряжениях частично нивелирует спад коротковолновой чувствительности фото-ЭДС вследствие роста напряженности внутреннего поля у поверхности, препятствующего процессам переноса основных носителей заряда к поверхностным рекомбинационным центрам и к центрам захвата. Наступление пробоя ОПЗ при $U_p \geq 0,6$ В отменяет это нивелирующее действие предположительно за счет снижения высоты поверхностного потенциального барьера пробоем и тем самым облегчает поставку ННЗ к поверхностным центрам рекомбинации и захвата.

Полученные в настоящей работе результаты свидетельствуют о слабом влиянии внешней электрической поляризации на длинноволновый участок спектра фото-ЭДС в системе p — Si — электролит и о существенном влиянии такой поляризации на форму коротковолнового спада. Конкретная форма спектра определяется балансом величин α^{-1} , L_d и параметрами ОПЗ, зависящими от напряжения поляризации. Наиболее вероятным физическим процессом, ограничивающим рост сигнала фото-ЭДС с повышением напряжения поляризации, является пробой в ОПЗ.

Список литературы

1. Саченко А. В., Снитко О. В. Фотоэффекты в приповерхностных слоях полупроводников. Киев, 1984.
2. Карева Г. Г., Коноров П. П. // Вопросы электроники твердого тела. Л., 1970. Вып. 3. С. 58.
3. Distefano T. H. // Nondestructive Evaluation of Semicond. Mater. and Devices. / NATO Advanced Study Inst. Ser. B. Phys. 1979. V. 46. P. 456.
4. Drugge B., Norlander E., Edlung P. // Phys. Scripta. 1981. V. 24. P. 392.