

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИФФУЗИОННОЙ ДЛИНЫ НЕОСНОВНЫХ НОСИТЕЛЕЙ В НЕИДЕАЛЬНЫХ ГЕТЕРОПЕРЕХОДАХ

Борщак В. А., Василевский Д. Л., Виноградов М. С., Сердюк В. В.

Известно, что диффузионную длину неосновных носителей тока в барьерных структурах можно определить прямыми методами при сканировании электронным, световым либо механическим зондом торца  $p-n$ -перехода. Для полупроводниковых фотоэлементов наиболее удобным является определение диффузионной длины по спектральной зависимости фототклика, измерение которого не требует специальной обработки образца, применяемой для прямых методов. Однако использование этой методики для неидеальных гетероструктур часто не приводит к получению достоверных результатов. Это связано с тем, что вид спектральной зависимости тока короткого замыкания  $j_{кз}(\lambda)$  неидеального гетероперехода определяется не только параметрами базовых слоев [спектром поглощения  $\alpha(\lambda)$ , диффузионной длиной  $L$ , толщиной поглощающего слоя  $h$ ], но и параметрами барьера. Скорость поверхностной рекомбинации на гетерогранице, а также эффективность разделения носителей барьером гетероперехода могут зависеть от условий фотовозбуждения [1], что делает применение простых формул [2] невозможным.

Типичный неидеальный гетеропереход образует пара  $CdS-Cu_2S$ , находящая применение в качестве фотопреобразователя. Особенности этого гетероперехода являются наличие многочисленных центров рекомбинации на границе раздела, а также значительная концентрация дырочных ловушек в области пространственного заряда, локализующегося в сульфиде кадмия.

Нами исследовались  $CdS-Cu_2S$ -гетерофотоэлементы с КПД 6—7 %, полученные методом вакуумного осаждения [3]. Спектральная зависимость тока короткого замыкания таких структур приведена на рисунке (кривая 1). Для численного моделирования этой зависимости использовались формулы для коэффициента собирания фотоэлемента, приведенные в [4]. При этом учитывалось, что область пространственного заряда в  $Cu_2S$  составляет  $\sim 10$  нм, т. е. в этот материал поле практически не проникает. Сведения о коэффициенте поглощения сульфида меди, ответственного за фоточувствительность  $CdS-Cu_2S$ -фотоэлементов, взяты из работы [5]. Толщина сульфида меди была измерена методом, описанным в [6], и составляет 0.6 мкм. При измерении спектральной зависимости фотоэлемент освещался со стороны широкозонного  $CdS$ , поэтому при толщине слоя сульфида меди, большей диффузионной длины (требование эффективной работы фотопреобразователя), граничные условия на внешней стороне пленки  $Cu_2S$  практически не влияют на вид спектральной зависимости. В таких условиях при расчетах поверхностную рекомбинацию на внешней стороне пленки  $Cu_2S$  можно не учитывать. Из рисунка видно, что наиболее близкая к экспериментальной расчетная кривая, соответствующая  $L=0.05$  мкм, не дает хорошего совпадения с экспериментальной зависимостью. Вместе с тем такое малое значение диффузионной длины не согласуется с высоким ( $\sim 7$  %) КПД исследуемых фотоэлементов.

Указанные противоречия обусловлены влиянием возбуждающего света на параметры барьера. Свет с длиной волны  $\lambda \sim 550-700$  нм не только формирует поток электронов из сульфида меди через гетерограницу, но и поглощается локальными центрами в  $CdS$ , которые при этом становятся положительно заряженными. В режиме тока короткого замыкания, т. е. при неизменной высоте барьера, это приводит к уменьшению его ширины согласно формуле

$$\omega = [2\epsilon\epsilon_0\varphi_0 e^2 (N_d + p_t)]^{1/2},$$

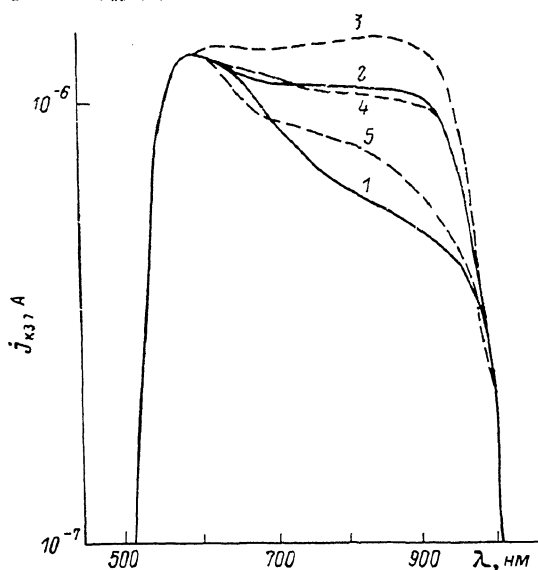
где  $\omega$  и  $\varphi_0$  — соответственно ширина и высота барьера,  $\epsilon$  — относительная диэлектрическая проницаемость  $CdS$ ,  $N_d$  — концентрация донорных центров в  $CdS$ ,  $p_t$  — концентрация положительно заряженных локальных центров

в CdS [7]. Резкое сужение барьера приводит к увеличению напряженности электрического поля у границы раздела, снижению доли рекомбинирующих носителей [1] и искажению зависимости  $j_{кз}(\lambda)$ .

Поглощение света в более длинноволновой области (700—1000 нм) приводит лишь к возбуждению сульфида меди, так как энергия квантов не соответствует энергетической глубине залегающих локальных уровней в CdS, накапливающих положительный заряд неравновесных дырок.

Таким образом, условия формирования фототока короткого замыкания оказываются различными для различных областей спектра фоточувствительности.

Для определения диффузионной длины электронов в сульфиде меди по кривым  $j_{кз}(\lambda)$  необходимо обеспечить постоянные условия их собиранья независимо от длины волны фотовозбуждения. Такие условия, как было показано выше, можно обеспечить сильной дополнительной подсветкой из области поглощения локальными центрами в CdS (550—700 нм). Однако подсветка из области собственного поглощения CdS ( $\lambda < 520$  нм) предпочтительнее, так как этот свет эффективнее поглощается и приводит к образованию большого коли-



Спектральное распределение тока короткого замыкания гетерофотоэлемента CdS—Cu<sub>2</sub>S.

1, 2 — экспериментальные кривые, измеренные соответственно в отсутствие и при наличии постоянной подсветки с  $\lambda < 520$  нм; 3—5 — расчетные зависимости для разных значений диффузионной длины  $L$ , мкм: 3 — 1,00, 4 — 0,35, 5 — 0,05.

чества неравновесных дырок, захватываемых локальными центрами в области пространственного заряда (ОПЗ). В этом случае напряженность поля в ОПЗ возрастает настолько, что монохроматический свет, необходимый для измерения кривой спектральной чувствительности, уже не в состоянии изменить параметры барьера. Интенсивность коротковолновой ( $\lambda < 520$  нм) подсветки выбиралась такой, что дальнейшее ее увеличение не приводило к изменению вида спектральной зависимости. Кривая 2 на рисунке, измеренная в таких условиях, свидетельствует о значительно большем вкладе сульфида меди в формирование фототока и резко отлична от кривой 1. Расчетная кривая полностью аппроксимирует экспериментальную зависимость при  $L=0,35$  мкм. Такое значение диффузионной длины хорошо согласуется с высокими КПД исследуемых фотоэлементов и приведенными в [8] результатами прямых электронных микронзондовых измерений. Таким образом, проведенные исследования свидетельствуют о том, что использование кривых  $j_{кз}(\lambda)$  и  $\alpha(\lambda)$  позволяет достоверно определить диффузионную длину неосновных носителей в неидеальных гетеропереходах. Однако для этого необходимо обеспечить постоянство коэффициента разделения носителей гетерограницы.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Виноградов М. С., Борщак В. А., Василевский Д. Л. Туннельный механизм потерь в гетерофотоэлементах. — Электрон. техн., сер. 2, Полупроводн. приборы, 1987, в. 1 (186), с. 48—50.
- [2] Павелец С. Ю., Федорус Г. А., Копонец Я. Ф. Оптимальная толщина слоя сульфида меди у фотоэлементов  $n$ -CdS— $p$ -Cu<sub>2</sub>- $s$ S. — ФТП, 1970, т. 4, в. 2, с. 347—349.
- [3] Шок Г. А., Биглер Г., Хевиг Г. Г., Шфистерер Ф., Блосс В. Г. Технология изготовления элементов большей площади на основе CdS—Cu<sub>2</sub>S. — В кн.: Солнечная энергетика. М., 1979, с. 313—324.

- [4] Васильев А. М., Ландсман А. П. Полупроводниковые фотопреобразователи. М., 1971. 248 с.
- [5] Stanley A. G. — Appl. Sol. St. Sci., 1975, v. 5, N 1, p. 251—352.
- [6] Колесовин В. Я., Василевский Д. Л., Виноградов М. С. Исследование стехиометрии слоев сульфида меди солнечных элементов, полученных в едином вакуумном цикле. — Электрохимия, 1985, т. 21, в. 2, с. 266—268.
- [7] Василевский Д. Л., Чемересюк Г. Г. Влияние поверхностной рекомбинации на фотоэлектрические свойства гетероперехода CdS—Cu<sub>2</sub>S. — ФТП, 1976, т. 10, в. 9, с. 1757—1759.
- [8] Чопра К., Дас С. Тонкопленочные солнечные элементы. М., 1986. 440 с.

Одесский государственный  
университет им. И. И. Мечникова

Получено 10.03.1987  
Принято к печати 9.10.1987

## ВТОРОЕ ИНФОРМАЦИОННОЕ СООБЩЕНИЕ

### XI ВСЕСОЮЗНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

Кишинев, октябрь 1988 г.

Научный совет по проблеме «Физика и химия полупроводников» АН СССР, Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе АН СССР, Институт прикладной физики АН СССР и Министрство высшего и среднего образования МССР проводят в октябре 1988 г. в г. Кишиневе XI Всесоюзную конференцию по физике полупроводников.

В программу XI конференции предполагается включение 25—30 приглашенных докладов по наиболее актуальным проблемам физики полупроводников, 80—100 оригинальных сообщений для зачитания и 150—180 стендовых докладов. Особое внимание будет обращено на следующие направления:

- 1) физические явления в гетероструктурах и сверхрешетках;
- 2) физические процессы в структурах с пониженной размерностью;
- 3) электронные и атомные процессы на границах раздела;
- 4) влияние разупорядоченности на электронные процессы в полупроводниках;
- 5) электронные явления в сильных электрических и магнитных полях;
- 6) физические явления в магнитных и полумагнитных полупроводниках;
- 7) фемто- и пикосекундная спектроскопия полупроводников;
- 8) современная диагностика полупроводниковых структур.

Срок представления тезисов докладов до 15 мая 1988 г.

#### *Правила оформления тезисов докладов*

1. Тезисы должны быть напечатаны на белой бумаге, на машинке со стандартным шрифтом, яркой лентой средней жирности, через 1.5 интервала. Размер формата текста 155××240 мм, размеры полей на странице (в см): слева 3.0, справа 1.0, сверху 2.5, снизу 2.0.
2. Название работы печатается сверху заглавными буквами, ниже — и. о. фамилии авторов, затем название учреждения, город, далее через 1.5 интервала — текст тезисов.
3. Формулы, схемы, графики или рисунки должны быть выполнены тушью по ходу текста.
4. Объем тезисов не должен превышать 2 страниц (3 страниц для приглашенных) машинописного текста, включая рисунки и библиографию.
5. Фамилию докладчика подчеркнуть во втором экземпляре, который должны подписать все авторы.
6. Страницы тезисов не нумеруются.
7. К тезисам прилагаются документы, необходимые для опубликования (в 2 экземплярах).
8. Тезисы следует присылать в 12 экземплярах упакованными без перегибов по адресу: 194021, Ленинград, Политехническая ул., 26. ФТИ им. А. Ф. Иоффе АН СССР, Конникову С. Г.

Тезисы будут изданы к началу конференции.

Труды конференции издаваться не будут. Тезисы, оформленные с отклонениями от настоящих правил, Программным комитетом рассматриваться не будут. Тезисы, не включенные в программу конференции, авторам не возвращаются.

Тезисы докладов, полученные после 15 мая 1988 г., рассматриваться не будут.

Оргкомитет  
Программный комитет