

ОСОБЕННОСТИ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАВИСИМОСТИ ФОТОТОКА НЕИДЕАЛЬНОГО ГЕТЕРОПЕРЕХОДА

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

Одесский госуниверситет им. И. И. Мечникова

Исследована температурная зависимость тока короткого замыкания неидеального гетероперехода. Экспериментально наблюдаемое температурное гашение фототока объясняется двухцентрковой моделью рекомбинации с привлечением механизма туннельно прыжкового переноса носителей тока в области пространственного заряда гетероперехода.

В работе исследовалась температурная зависимость тока короткого замыкания неидеального гетероперехода (ГП) CdS-Cu₂S при возбуждении его ИК-светом с длиной волны 930 нм. На рис. 1 приведено семейство кривых температурного гашения тока короткого замыкания ГП при различных интенсивностях ИК возбуждения. Из графиков видно, что для каждой интенсивности возбуждения, начиная с некоторой температуры наблюдается уменьшение фототока. Экстраполяция линейных участков экспериментальных кривых позволяет определить точки начала температурного гашения. По наклону прямой, проведенной через эти точки, можно вычислить энергию активации исследуемого процесса. Расчеты, проведенные в соответствии с моделью, предложенной в работе [1], дают энергию активации наблюдаемого температурного гашения $E = 1,05$ эВ, что согласно указанной модели является глубиной залегания медленных центров рекомбинации.

При возбуждении ГП CdS-Cu₂S ИК светом генерация электронно-дырочных пар происходит в слое Cu₂S, т. к. CdS для света с длиной волны 930 нм является прозрачным. Однако процесс рекомбинации по двухцентрковой модели, указанной выше работы, не может быть реализован в слое сульфида меди. Это предположение следует из того, что в процессе температурного гашения тока принимают участие два глубоких центра рекомбинации, причем энергетический уровень менее глубокого с малым сечением захвата электрона определен из эксперимента и составляет 1,05 эВ, а ширина запрещенной зоны сульфида меди составляет всего 1,2 эВ. Следовательно, рекомбинация генерированных носителей тока, зависящая от температуры, происходит не в слое Cu₂S.

Наблюдаемую зависимость тока короткого замыкания от температуры можно объяснить в рам-

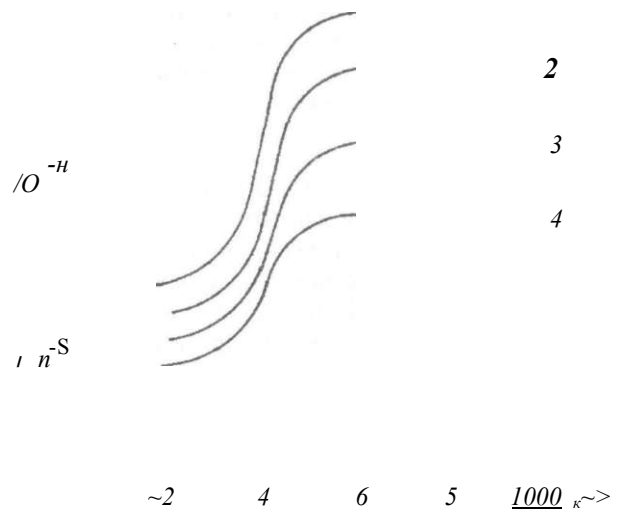


Рис. 1. Температурное гашение тока короткого замыкания гетероперехода при различных интенсивностях ИК возбуждения.

ках предлагаемой нами модели, основанной на туннельно-рекомбинационном механизме (Рис. 2). Электронно-дырочные пары, генерированные в слое сульфида меди при освещении ГП ИК светом, разделяются полем перехода. При этом электроны переносятся полем перехода в слой сульфида кадмия, имея возможность частично прорекомбинировать на состояниях границы раздела, либо принять участие в формировании тока короткого замыкания, а фотоэнергетически возбужденные дырки остаются в валентной зоне сульфида меди. Вместе с тем, существует определенная вероятность туннелирова-

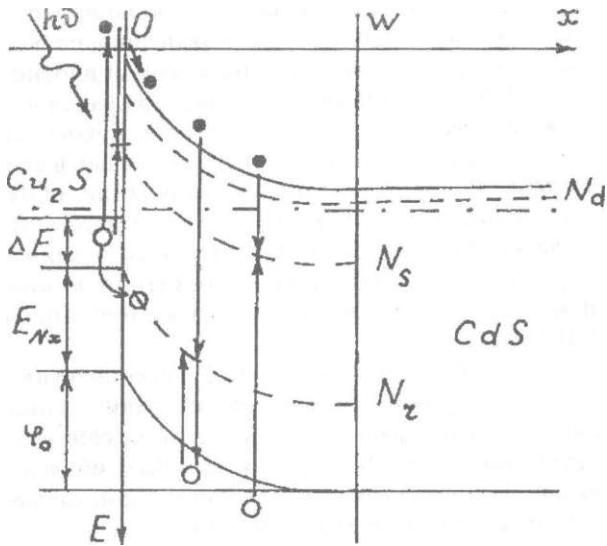


Рис. 2. Зонная схема механизма рекомбинации неравновесных носителей заряда, генерируемых ИК светом, предлагаемой нами модели температурного гашения фототока в ГП сульфид кадмия — сульфид меди.

ния дырок на акцепторные центры, расположенные в области пространственного заряда (ОПЗ) ГП, и последующего захвата электронов из зоны проводимости сульфида кадмия на эти центры.

При постоянной скорости генерации электронно-дырочных пар с увеличением температуры образца возрастает вероятность возбуждения дырок с этих г-центров в валентную зону сульфида кадмия. Свободные дырки, оказавшиеся в валентной зоне ОПЗ ГП, могут переноситься полем обратно в валентную зону сульфида меди, либо быть захваченными быстрыми s-центрами рекомбинации. Наблюдаемое температурное гашение фототока указывает на то, что вероятность последнего процесса выше. Каждой концентрации неравновесных дырок, протуннелировавших в ОПЗ и захваченных на г-центры рекомбинации, (увеличивающейся пропорционально интенсивности ИК возбуждения), соответствует температура, при которой темп перекачки их на s-центры рекомбинации превосходит их темп возврата в сульфид меди.

Зная скорость рекомбинации неравновесных электронов с протуннелировавшими на центры рекомбинации дырками, можно сравнить кривую, рассчитанную по предлагаемой нами модели температурного тушения фототока, с экспериментальной зависимостью. В процессе рекомбинации принимают участие глубокие центры, наличие которых в ОПЗ ГП связано с диффузией ионов меди при формировании гетероструктуры.

Исследуемую температурную зависимость тока при возбуждении гетероперехода ИК светом, поглощаемым узкозонным полупроводником, удоб-

но представить выражением, аналогичным выведе-

$$\frac{u \cdot J \frac{dq}{dx} \Big|_{x=0}}{I \frac{dcp}{q dx} \Big|_{x=0} + s_f + s_v} \quad (1)$$

Здесь первый множитель I_0 — ток насыщения при постоянной интенсивности ИК возбуждения. Второй множитель характеризует рекомбинационные потери на границе ГП и в объеме ОПЗ, где $I \frac{dcp}{q dx} \Big|_{x=0}$ и S_s — скорость носителей заряда и скорость рекомбинации соответственно на границе раздела гетероструктуры практически не зависят от температуры. Зависящая от температуры величина S , характеризует потери электронов на центрах рекомбинации в ОПЗ ГП и наряду со скоростью поверхностной рекомбинации S_f определяет часть электронов, прошедших в квазинейтральную область сульфида кадмия.

Скорость рекомбинации в ОПЗ ГП описывается выражением

$$s_v = VG_r P_r$$

где v — средняя тепловая скорость носителя заряда, σ — сечение захвата г-центра рекомбинации, P — концентрация заряда, захваченного на центры рекомбинации в ОПЗ.

В пользу такого предположения свидетельствует проделанный нами эксперимент, из которого следует, что при достаточно сильном коротковолновом возбуждении ток практически не зависит от температуры. Измерения проводились при двух температурах — 77 К и 293 К. Эксперимент подтверждает, что в формуле (1) при достаточно большом значении напряженности поля на гетерогранице, когда выполняется условие

$$1 \ll \frac{\phi}{q dx} \gg S_f + S_v \quad \text{ток короткого замыкания}$$

определяется величиной I_0 . В то же время, как отмечалось выше, при возбуждении гетероперехода

только ИК светом (в этом случае $\frac{I \text{ffy}}{q dx} \Big|_{x=0} \gg S_f + S_v$ не выполняется)

лико и условие (1) $\frac{I \text{ffy}}{q dx} \Big|_{x=0} \gg S_f + S_v$ не выполняется)

с понижением температуры I_0 существенно возрастает. Так как величина S от температуры не зависит, то рост I_0 при понижении температуры, согласно (1) можно объяснить только уменьшением скорости объемной рекомбинации S

Рассмотрим, каким образом дырки, генерированные светом в слое сульфида меди, могут попадать на центры рекомбинации, расположенные в слое сульфида кадмия.

В предположении прямого тунелирования дырок из валентной зоны Cu_2S на центры рекомбина-

ции ОПЗ в CdS были проведены расчеты концентрации заряда P_z , захваченного на центры рекомбинации N_r . Расчеты проводились по формуле, имеющей для такого случая вид

где $D(x)$ — коэффициент прозрачности барьера.

Результаты расчета зависимости величины $n_{xp} \left[\frac{AE}{IcT} \right]$ от координаты x , проведенные для трех различных температур при прямом туннелировании, показывают очень резкое убывание концентрации заряда от гетерограницы вглубь ОПЗ. Расчет величины P_z при такой зависимости дает пренебрежимо малое значение заряда, захваченного на центры рекомбинации, которое не может объяснить экспериментально наблюдаемую зависимость.

Тем не менее, дырки, генерированные в слое сульфида меди, попадают на центры рекомбинации, расположенные в слое сульфида кадмия. Этот процесс можно объяснить следующим образом. В исследуемом неидеальном ГП степень несоответствия параметров кристаллических решеток на металлургической границе составляет величину порядка 4%, что создает высокую концентрацию дефектов в узком пограничном слое ОПЗ. Нарушение трансляционной симметрии на гетерогра-

нице приводит к размытию краев зоны проводимости и валентной зоны и появлению по всей запрещенной зоне достаточно высокой плотности состояний. Учитывая это, представляется возможным реализация туннельно-прыжкового механизма переноса дырок, генерированных в слое сульфида меди, на центры рекомбинации в ОПЗ по локализованным состояниям в соответствии с моделью Мотта и Дэвиса. Указанный механизм переноса может обеспечить достаточную концентрацию дырок на центрах рекомбинации в ОПЗ ГП.

Таким образом, наблюдаемое экспериментально температурное гашение тока короткого замыкания, генерированного в неидеальном гетеропереходе CdS-Cu₂S ИК светом, может быть объяснено с привлечением механизма туннельно-прыжкового переноса носителей в ОПЗ ГП.

Литература

1. Сердюк В. В., Чемересюк Г. Г., Терек М. Фотоэлектрические процессы в полупроводниках. — Киев — Одесса, Вища школа. — 1982. — 152 с.
2. Виноградов М. С. Туннельно-рекомбинационные процессы в гетеропереходе сульфид кадмия — сульфид меди. Дисс. канд. физ.-мат. наук. — Одесса, 1986. — 130 с. — Машинопись.