

## ВЛИЯНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ РЕКОМБИНАЦИИ НА ФОТОЭЛЕКТРОННУЮ ЭМИССИЮ ИЗ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ СРОДСТВОМ

А.Д.Коринфский, А.Л.Мусатов

Показано, что скорость поверхностной рекомбинации  $S$  на GaAs и InGaAsP с отрицательным электронным сродством достигает величин  $\sim 10^6$  см/с и оказывает сильное влияние на квантовый выход фотоэмиссии. Проведенный анализ показывает, что большие значения  $S$  определяются частично диффузным отражением электронов от поверхности.

Выход фотоэлектронов из полупроводников в вакуум представляет собой столь быстрый процесс ( $\tau \leq 10^{-14}$  с), что поверхностная рекомбинация обычно не рассматривается при анализе процесса фотоэлектронной эмиссии<sup>1</sup>. В<sup>2,3</sup> было высказано предположение, что в случае полупроводников с отрицательным электронным сродством (ОЭС) поверхностная рекомбинация оказывает влияние на квантовый выход фотоэмиссии. В настоящем сообщении приведены результаты первых исследований скорости поверхностной рекомбинации  $S$  на полупроводниках с ОЭС и ее влияния на квантовый выход фотоэмиссии из таких полупроводников.

Исследования проводились в сверхвысоковакуумной установке ( $p \sim 10^{10}$  мм рт.ст.) на эпитаксиальных слоях GaAs и InGaAsP ( $E_g = 1,17$  эВ),  $p$ -типа легированных цинком с концентрацией около  $5 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup>. Образцы очищались прогревом в сверхвысоком вакууме и активировались цезием и кислородом до реализации условия ОЭС и получения максимума фотоэмиссии<sup>2,4</sup>. Измерения скорости поверхностной рекомбинации проводились методом катодолюминесценции<sup>5</sup>. Метод состоит в измерении зависимости интенсивности катодолюминесценции  $I_{\text{Д}}$  от энергии падающих электронов  $\epsilon$ . Величина скорости поверхностной рекомбинации определялась путем сравнения экспериментальных характеристик  $I_{\text{Д}}(\epsilon)$  с теоретическими характеристиками, полученными на основе решения диффузионного уравнения для неравновесных электронов с граничными условиями, содержащими  $S$ <sup>5</sup>.

$$D \frac{dn(x)}{dx} \Big|_{x=d} = Sn(x) \Big|_{x=d} \quad (1)$$

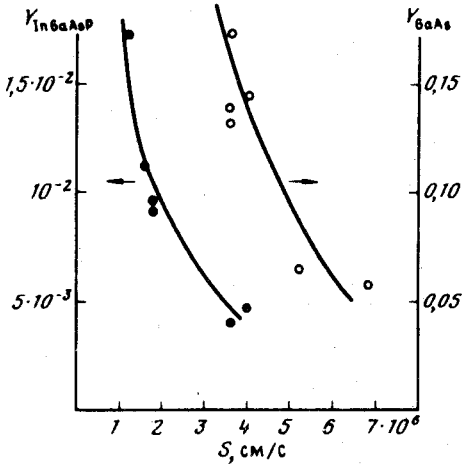
$$n \rightarrow 0 \text{ при } x \rightarrow \infty$$

Здесь  $D$  – коэффициент диффузии неосновных носителей,  $n(x)$  – концентрация электронов, а  $d$  – ширина области пространственного заряда.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунке, где представлены зависимости квантового выхода фотоэмиссии от скорости поверхностной рекомбинации для GaAs ( $\lambda = 0,8$  мкм) и InGaAsP ( $\lambda = 1$  мкм) с ОЭС. Экспериментальные точки соответствуют разным образцам GaAs и InGaAsP, которые имели различные величины скорости поверхностной рекомбинации. Как видно из рисунка, для исследованных образцов имеется четкая корреляция между величиной скорости поверхностной рекомбинации и квантовым выходом фотоэмиссии. Увеличение скорости поверхностной рекомбинации приводит к падению квантового выхода фотоэмиссии.

Из рисунка видно, что значения скорости поверхностной рекомбинации на исследованных образцах весьма велики и составляют  $(1 \div 7) \cdot 10^6$  см/с, что близко к максимально возможной величине для данных полупроводников ( $S_{\text{max}} = \frac{1}{4} \bar{v}_T = 1 \cdot 10^7$  см/с, где  $\bar{v}_T$  – средняя тепловая скорость электронов). Представляет интерес обсудить, какие свой-

ства поверхности полупроводника определяют столь высокую скорость поверхностной рекомбинации и как они влияют на эффективность фотоэмиссии. Прежде всего отметим, что, как следует из выражения (1), измеряемая скорость поверхностной рекомбинации относится не к поверхности полупроводника, а к границе области пространственного заряда (ОПЗ), связанного с приповерхностным изгибом зон (зоны изогнуты вниз), т.е. это эффективная скорость поверхностной рекомбинации. Поэтому величина  $S$  определяется не только сечением захвата и концентрацией поверхностных состояний, но и переносом электронов через ОПЗ.



Зависимость квантового выхода фотоэмиссии от скорости поверхностной рекомбинации для GaAs ( $\lambda = 0,8$  мкм) и InGaAsP ( $\lambda = 1$  мкм) с отрицательным электронным средством

В сильном электрическом поле ОПЗ энергия электронов резко увеличивается и достигает величины изгиба зон ( $v_B \approx 0,5$  эВ). Поэтому рассеяние электронов в ОПЗ на ионизованных примесях можно не учитывать, несмотря на большую концентрацию последних, и основным механизмом рассеяния электронов в этой области является рассеяние на полярных оптических фононах. Длина свободного пробега горячих электронов в GaAs и InGaAsP при рассеянии на полярных оптических фононах  $l_{p0} \approx 700 \text{ \AA}^3$ , что значительно превышает ширину ОПЗ при данном уровне легирования. Поэтому электроны проходят ОПЗ без рассеяния и рекомбинации ( $L_{\text{диф}} \gg 1$  мкм) и поток электронов в ОПЗ можно представить как сумму двух потоков: прямого и отраженного от поверхности. При этом, только электроны, зеркально отраженные от поверхности, сохраняют нормальную компоненту импульса достаточную, чтобы преодолеть электрическое поле и достигнуть границы ОПЗ. В соответствии с кинетической теорией поток электронов в ОПЗ вблизи его границы с объемом полупроводника равен

$$j_1 = \frac{1}{4} \bar{v}_T n(d) - \frac{1}{4} \bar{v}_T n(d) R_m = \frac{1}{4} \bar{v}_T n(d) (1 - R_m), \quad (2)$$

где  $n(d)$  — концентрация электронов на границе ОПЗ, а  $R_m$  — коэффициент зеркального отражения электронов от поверхности. Поток  $j_1$  равен диффузионному потоку в объеме полупроводника вблизи границы ОПЗ

$$j_1 = \frac{1}{4} \bar{v}_T n(d) (1 - R_m) = D \left. \frac{dn(x)}{dx} \right|_{x=d} \quad (3)$$

Сравнивая (1) и (3) получим, что

$$S = \frac{1}{4} \bar{v}_T (1 - R_m), \quad (4)$$

т.е. скорость поверхностной рекомбинации определяется величиной коэффициента зеркального отражения электронов от поверхности  $R_m$ .

Анализ экспериментальных результатов в соответствии с выражением (4) показывает, что для GaAs фотокатодов величина  $R_m$  лежит в пределах  $0,3 \div 0,65$ , а для InGaAsP  $R_m = 0,6 \div 0,9$ , т.е. отражение электронов от поверхности носит частично диффузный характер. Электроны, диффузно отраженные от поверхности, не смогут выйти из потенциальной ямы в области изгиба зон и в конечном счете рекомбинируют. Таким образом, большие скорости поверхностной рекомбинации, измеренные нами на сильнолегированных полупроводниках GaAs и InGaAsP  $p$ -типа, связаны с существованием вблизи поверхности потенциальной ямы для электронов (область изгиба зон) и частично диффузным характером отражения электронов от поверхности.

В заключение рассмотрим вопрос, каким образом увеличение диффузного отражения электронов от поверхности, приводящее к увеличению эффективной скорости поверхностной рекомбинации, может вызвать падение квантового выхода фотоэмиссии. Согласно работе <sup>3</sup> прозрачность границы полупроводник – вакуум мала даже для электронов с энергией выше потенциального барьера, и большинство электронов выходят в вакуум лишь после многократного прохождения области изгиба зон. Увеличение диффузного отражения от поверхности приводит к тому, что электроны быстрее теряют нормальную компоненту импульса и опускаются ниже уровня вакуума.

Авторы благодарны А.М.Когану, Р.А.Сурису, В.Д.Шадрину и А.Я.Шульману за обсуждение результатов работы.

#### Литература

1. *Соммер*. Фотоэмиссионные материалы (пер. с англ.), М.: Энергия, 1978.
2. *Белл Р.Л.* Эмиттеры с отрицательным электронным средством (пер. с англ.), М.: Энергия, 1978.
3. *Мусатов А.Л., Коротких В.Л.* Известия АН СССР, сер. физическая, 1982, 46, 1357.
4. *Мусатов А.Л., Турчинский В.М., Лебедев А.В., Яценко Л.Е.* Радиотехника и электроника. 1981, 26, 2421.
5. *Коринфский А.Д., Мусатов А.Л.* ПТЭ, 1983, № 1, 163.