

СПЕКТРАЛЬНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ КВАНТОВОГО ВЫХОДА ВНУТРЕННЕЙ ФОТОЭМИССИИ С УЧЕТОМ РАССЕЯНИЯ ГОРЯЧИХ НОСИТЕЛЕЙ В МЕТАЛЛЕ

С.А. Крюков, А.Ф. Плотников

Обсуждается ограничение на применимость фотоэлектрического метода определения энергетических порогов на границе металл – полупроводник, связанное с рассеянием горячих носителей в металле.

Фотоэлектрический метод определения энергетических порогов на границе металл – полупроводник является наиболее прямым и точным [1]. Он основан на теории Фаулера для эмиссии в вакуум [2] и требует измерения зависимости квантового выхода Y от энергии фотона $\hbar\omega$.

По теории Фаулера

$$Y \propto \int_{E_{th}}^{\hbar\omega} p(E) \Omega(E) dE, \tag{1}$$

где $p(E)$ – плотность вероятности фотовозбуждения электрона до энергии E ; $\Omega(E)$ – вероятность, с которой направление импульса электрона с энергией E удовлетворяет условию прохождения через барьер; E_{th} – порог фотоэмиссии. Энергия отсчитывается от уровня Ферми металла.

При условии малости возбуждения (1) приводит к выражению

$$Y \propto (\hbar\omega - E_{th}^e)^2, \tag{2}$$

с помощью которого экспериментально определяется E_{th}^e .

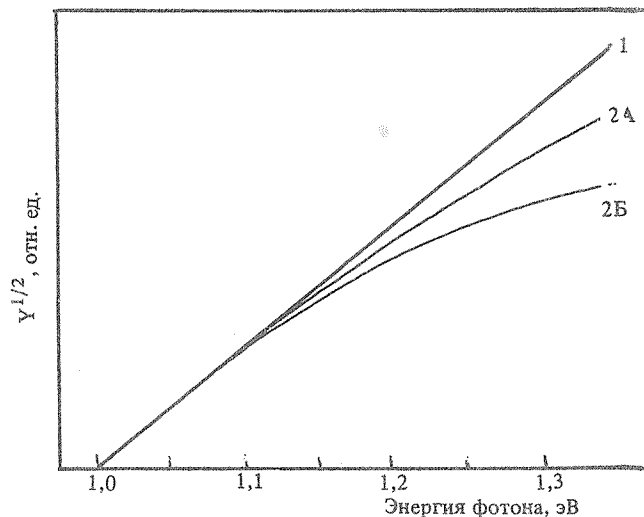
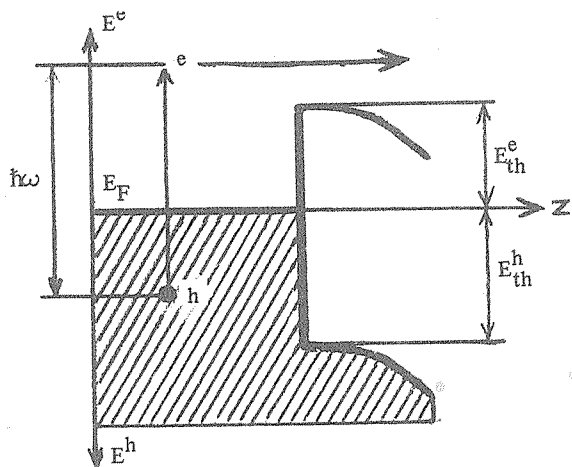


Рис. 1. Энергетическая диаграмма границы раздела металл – полупроводник. Показан случай фотовозбуждения и инжекции электрона в зону проводимости полупроводника.

Рис. 2. Зависимость квадратного корня из квантового выхода ВФЭ Y от энергии фотона $\hbar\omega$ без учета (кривая 1) и с учетом (кривая 2) поглощения горячих носителей. Толщина пленки металла $d = 50$ нм, длина поглощения горячих носителей $L = 50$ нм (А), $L = 5$ нм (Б).

В случае эмиссии в полупроводник говорят о внутренней фотоэмиссии (ВФЭ) горячих электронов в зону проводимости полупроводника и фермиевских дырок в валентную зону (рис. 1). Соотношения (1) и (2) остаются справедливыми, но с дополнительными оговорками. Так, в /3/ проанализирована особенность, связанная с конкуренцией ВФЭ носителей обоих знаков.

Имеется еще одно ограничение, существенное и для эмиссии носителей одного знака. Оно связано с рассеянием горячих носителей в металле при их переносе от места возбуждения к границе, через которую идет эмиссия.

Обычно большая часть горячих носителей возникает вблизи границы пленки металла, противоположной границе с полупроводником, т.к. возбуждающая световая волна затухает в глубь металла. Часть носителей с энергией $E > E_{th}$, возбужденных вдали от границы с полупроводником, теряют эту энергию из-за процессов рассеяния.

Принято характеризовать горячие носители с энергией E транспортной длиной L , считая (весьма упрощенно), что вероятность переноса носителя через границу $z=d$ (d — толщина пленки металла) пропорциональна $\exp[-(D-z)/L(E)]$. При этом подынтегральное выражение в (1) должно быть умножено на

$$\int_0^d A(z, \hbar\omega) \exp[-(D-z)/L(E)] dz, \quad (3)$$

где d — толщина пленки металла; $A(z, \hbar\omega)$ — плотность поглощаемой мощности световой волны — функция возбуждения, которую следует вычислять с учетом интерференции в тонких пленках.

Если учесть, что L сильно зависит от E /4/:

$$L(E) \propto 1/E^2, \quad (4)$$

зависимость $Y^{1/2}(\hbar\omega)$, линейная согласно (2), будет существенно отличаться от линейной, что может привести к ошибке экстраполяции с целью определения E_{th} .

Сравним металлы с различными длинами поглощения горячих носителей при $E \approx E_{th} = 1$ эВ: большой ($L = 50$ нм) и малой ($L = 5$ нм). Первый случай характерен для таких металлов, как Au, Ag; второй — Al (дырки), Cu /4/ (стр. 221), аморфный Ni /5/.

Результаты численных расчетов с учетом (3), (4) показывают (рис. 2), что в случае малых L ($L = 0,1 d$ при $d = 50$ нм) зависимость $Y^{1/2}(\hbar\omega)$ далека от линейной и может привести к ошибке в определении E_{th} . Этот результат подтвержден экспериментально авторами /6/, которые наблюдали сужение спектрального диапазона, в котором приближенно выполняется (2), с увеличением толщины пленки Ni в системе Ni-ZnSe.

Применение соотношения (2) для определения E_{th} ограничено условием $d \lesssim L$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Crowell C. R. et al. Phys. Rev., 127, 2006 (1962).
2. Fowler R. N. Phys. Rev., 38, 45 (1931).
3. Плотников А. Ф., Толоконников В. А. Труды ФИАН, 184, 127 (1987).
4. Чопра К. Л. Электрические явления в тонких пленках. М., Мир, 1972.
5. Крюков С. А., Пудонин Ф. А., Толоконников В. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, № 12, 40 (1987).
6. Malinovskaya O. K., Plotnikov A. F., Tolokonnikov V. A. Phys. Stat. Sol. (a), 98, K 191 (1986).

Поступила в редакцию 17 января 1989 г.