

## ОЦЕНКА ДЛИНЫ ПОГЛОЩЕНИЯ ГОРЯЧИХ НОСИТЕЛЕЙ В АМОРФНОМ НИКЕЛЕ

С.А. Крюков, Ф.А. Пудонин, В.А. Голоконников

*Получена оценка сверху длины поглощения горячих носителей с энергиями  $\sim 1$  эВ относительно уровня Ферми в аморфном никеле на основе измерений токов внутренней фотоэмиссии в структурах Ni-ZnSe-SiO<sub>2</sub>-Si.*

Одной из проблем теории внутренней фотоэмиссии (ВФЭ) из металла в диэлектрик является учет упругих и неупругих процессов рассеяния возбужденных светом (горячих) носителей в объеме и на границе металла. При достаточно высоких энергиях носителя за потерю энергии ответственны электрон-электронные взаимодействия, в одном акте которых носитель теряет порядка половины своей энергии относительно уровня Ферми /1,2/. В результате его энергия оказывается недостаточной для преодоления энергетического барьера на границе с диэлектриком. Электрон-фононные взаимодействия при этом можно считать упругими /3/.

Принято вводить длину  $L$ , на которой горячий носитель теряет энергию превышения над порогом для ВФЭ, называемую длиной поглощения (или рассеяния) горячих носителей /4/. Величина  $L$  связана с длинами свободного пробега  $l_e$  и  $l_p$  соответственно по отношению к электрон-электронному и электрон-фононному взаимодействию, причём  $l_e$  и  $l_p$  не могут быть определены из эксперимента непосредственно и энергетически зависимы.

В предельном случае  $L \lesssim 1/a$  ( $a$  — коэффициент оптического поглощения в металле) величина  $L$  не влияет на форму кривой, описывающей зависимость тока ВФЭ  $I$  от толщины  $H$  слоя металла /3/. В этом случае теоретический расчет  $I(H)$  дает мало отличающиеся результаты, если пробег горячего электрона до первого электрон-электронного столкновения считать баллистическим (при этом  $L = l_e$ ) или если считать его диффузионным (при этом  $L$  интерпретируется как длина диффузии за время между электрон-электронными взаимодействиями).

Общий случай переноса горячих носителей до первого электрон-электронного взаимодействия является промежуточным между баллистическим и диффузионным, что представляет основную трудность описания ВФЭ и интерпретации экспериментов /4/.

В настоящей работе экспериментально показано, что для ВФЭ из аморфного Ni в ZnSe как для электронов, так и для дырок имеет место предельный случай  $L \lesssim 1/a$ .

Экспериментальные образцы изготавливались на подложке Si, на которой термическим окислением формировался слой SiO<sub>2</sub>. На поверхности SiO<sub>2</sub> напылялся слой ZnSe методом термического распыления в вакууме и аморфный слой Ni методом ионно-плазменного ВЧ распыления (рис. 1). В процессе изготовления оптические свойства структур контролировались с помощью эллипсометра. После нанесения ZnSe и контроля была выбрана наиболее однородная по оптическим свойствам серия из 13 образцов, поляризационные углы в которой совпадали в пределах 8%. На каждый из полученных образцов напылялись две площадки Ni размерами 2 × 3 мм (рис. 1). Слой SiO<sub>2</sub> препятствовал протеканию сквозного тока через структуру и тока ВФЭ из Si.

Схема измерения токов ВФЭ представлена на рис. 1. Площадка Ni освещалась светом He-Ne лазера с длиной волны 1,15 и 0,63 мкм. Для длины волны 1,15 мкм  $\hbar\omega = 1,07$  эВ  $> E_{th}^e > E_{th}^h$  ( $E_{th}^h = (0,96 \pm 0,02)$  эВ /5/,  $E_{th}^e$  — соответственно пороги для ВФЭ дырок и электронов).

Воспроизводимость результатов достигалась проведением перед каждым измерением подготовительной процедуры, которая заключалась в выдерживании структуры в темноте в закороченном состоянии, затем в присутствии внешнего смещения, при котором производились измерения. Такая процедура занимала около 5 минут и обеспечивала приведение в исходное зарядовое состояние центров захвата (ЦЗ) в ZnSe.

Величина фотоотклика в максимуме  $I_{\text{exp}}$  (рис. 1) линейно зависела от освещенности площадки Ni в пределах  $10^{-13} \text{ A} \leq I_{\text{exp}} \leq 10^{-11} \text{ A}$ , что служило критерием пропорциональности  $I_{\text{exp}}$  фотоэмиссионной способности системы Ni-ZnSe. При больших величинах фотоотклика линейность нарушалась из-за быстрой перезарядки ЦЗ в ZnSe, что приводило к возникновению объемного заряда. Поэтому во всех измерениях освещенность структуры регулировалась системой светофильтров так, чтобы выполнялось условие  $10^{-13} \text{ A} \leq I_{\text{exp}} \leq 10^{-12} \text{ A}$ . ВФЭ дырок наблюдалась при внешнем смещении +5В, электронов — при смещении 0,02 В.

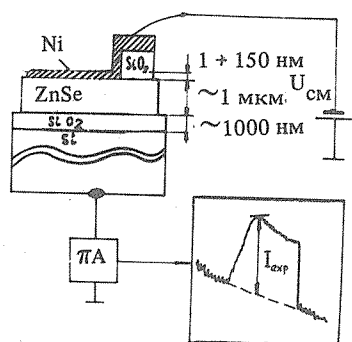


Рис. 1. Схема измерения токов ВФЭ и характерный вид наблюдаемого фотоотклика.

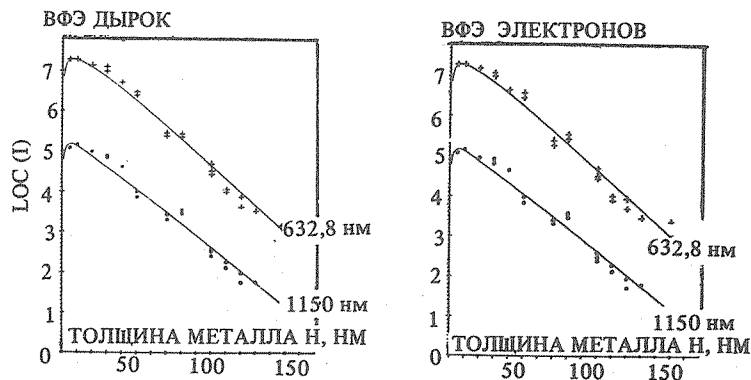


Рис. 2. Фотоотклик, обусловленный ВФЭ дырок (а) и электронов (б) в зависимости от толщины  $H$  слоя Ni для длины волны 1150 (·) и 632,8 (+) нм.

На рис. 2 представлены результаты сравнения  $I_{\text{exp}}(H)$  с расчетом. Теоретические кривые получены на основе баллистической модели. Зависимость плотности световой мощности, поглощаемой в металле, от глубины (функция возбуждения) вычислялась в рамках теории распространения плоской электромагнитной волны в слоистой среде с идеально резкими границами раздела.

Совпадение с экспериментом давали те зависимости  $I(H)$ , для которых  $L \leq 10$  нм. При этом на рис. 2 прямолинейные участки кривых определяются зависимостью  $\exp(-H/a)$  для значений  $a$ , взятых из /6/. Следовательно, для горячих носителей с энергиями  $\sim 1$  эВ относительно уровня Ферми в аморфном Ni имеет место предельный случай  $L \lesssim 1/a$ , когда сравнение с экспериментом дает лишь оценку  $L$  сверху.

Теоретические оценки длины  $l_p$  /7, 8/ позволяют сделать вывод /4/, что для  $L$ , меньших или порядка 10 нм, роль электрон-фононного взаимодействия незначительна. Таким образом, в данном случае  $L = l_e$ , а движение носителей между электрон-электронными взаимодействиями можно считать баллистическим.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Stuart R.N., Wooten F., Spier W.E. Phys. Rev., 135A, A495 (1964).
2. Stuart R.N., Wooten F. Phys. Rev., 156, 364 (1967).
3. Codlec J. Phys. Rev. Lett. C., 26, 70 (1976).
4. Чопра К. Л. Электрические явления в тонких пленках. М., Мир, 1972.
5. Толоконников В. А. Автореферат канд. диссертации. М., ФИАН, 1984.
6. Johnson P.B., Christy R.W. Phys. Rev. B., 9, № 12, 5056 (1974).
7. Wilson A.H. Theory of Metals, Cambridge Univ. Press., N.Y., 1955.
8. Koshiga F., Sugano T. Japan. J. Appl. Phys., 5, 1036 (1966).

Поступила в редакцию 5 февраля 1987 г.  
После переработки 12 октября 1987 г.