

## ЭФФЕКТ УВЛЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОНОВ СВЕТОМ В ПОЛУМЕТАЛЛАХ

Е.В.Берегулин, П.М.Валов, С.М.Рывкин  
И.Д.Ярошецкий, И.С.Лискер, А.Л.Пукшанский

Обнаружено увлечение носителей заряда в висмуте светом  $\text{CO}_2$ -лазера. Эффект анизотропен и продольная ЭДС увлечения меняет знак в интервале  $T = 300 \div 77,3\text{К}$ .

Фотоэлектрический эффект, обусловленный импульсом света, был обнаружен и исследовался в полупроводниках [1 – 5] при поглощении света свободными носителями. Можно показать, что в полуметаллах и металлах вследствие большого коэффициента поглощения света  $\alpha$  величина продольной по отношению к импульсу фотонов  $\hbar\kappa$  ЭДС увлечения должна быть очень мала. Это приводит к значительным трудностям при экспериментальном наблюдении эффекта. В работе [6] авторы наблюдали сигнал в катушке, помещенной вблизи поверхности металла, при облучении этой поверхности импульсом от рубинового лазера. Они полагают, что возникающий сигнал связан с током, обусловленным давлением света на электроны в металле.

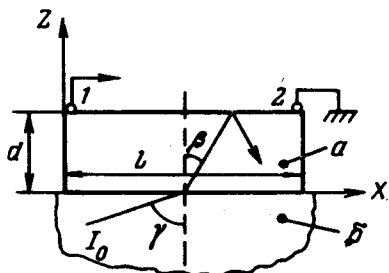


Рис. 1. Наклонное падение света на висмут:  $d, l$  – толщина и длина пленки;  $a$  – пленка висмута;  $b$  – подложка из кремния; 1, 2 – электрические контакты

В настоящей работе приводятся результаты экспериментального наблюдения и исследования эффекта увлечения в пленках полуметаллов, в которых была непосредственно измерена ЭДС увлечения. Для пленок, сравнимых по толщине с глубиной проникновения света, можно указать следующие ситуации, облегчающие регистрацию ЭДС увлечения: приложение поперечного по отношению к  $\vec{\kappa}$  магнитного поля [3], наблюдение поперечной ЭДС увлечения в материалах с анизотропным эффектом увлечения [4, 5] и наклонное падение света [6, 7]. В качестве примера с учетом результатов [5] приведем величину ЭДС увлечения для равномерно освещенной пленки в направлении нормали  $V_z$  и границы раздела  $V_x$  при наклонном падении света (рис. 1):

$$V_x = V_z \frac{l}{d} \operatorname{tg} \beta; \quad V_z = \frac{(1-R)e\hbar\kappa l_0 \langle \tau \rangle}{m^* \sigma} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\alpha d}{\cos \beta}\right) \right] \cos \gamma \cos^2 \beta, \quad (1)$$

где  $e, m^*, \sigma$  – соответственно заряд электрона, эффективная масса носителей и проводимость пленки висмута;  $I_0$  – интенсивность света на границе раздела,  $R$  – коэффициент отражения и  $\langle \tau \rangle$  – усредненное время релаксации направленного импульса носителей.

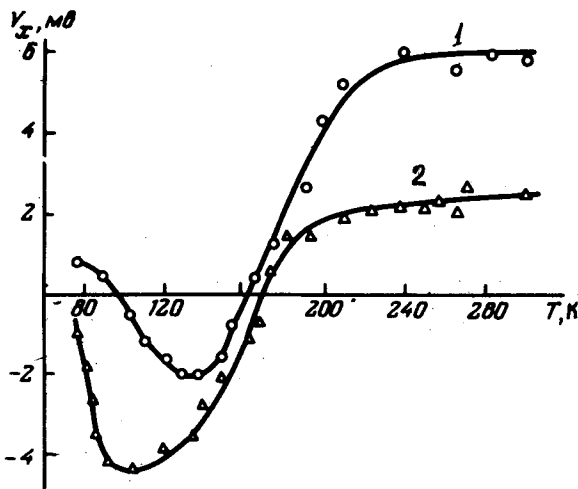


Рис. 2. Зависимость ЭДС увлечения в висмуте от температуры при наклонном падении света: 1 —  $\lambda = 10,6$  мкм, мощность лазера 10 мвт; 2 —  $\lambda = 9,54$  мкм, мощность лазера 5 мвт

Как видно из (1),  $V_x$  больше  $V_z$  в  $\sim \frac{l}{d} \operatorname{tg} \beta$  раз.

В экспериментах использовался импульсный  $\text{CO}_2$ -лазер с перестройкой частоты в диапазоне длин волн  $\lambda \approx 9,2 \div 10,8$  мкм. Интенсивность света на образце была на таком уровне, который исключал появление паразитных фотоэдс<sup>1)</sup>.

В качестве объекта исследования был выбран висмут вследствие больших величин сечения поглощения света и показателя преломления и значительной глубины проникновения света  $\sim 1$  мкм. В ориентированных пленках висмута должна наблюдаться анизотропия тока увлечения [4] вследствие несферичности его изознергетических поверхностей в зоне проводимости и валентной зоне. Из симметрии кристалла следует, что поперечная ЭДС увлечения должна равняться нулю, если направление  $\vec{k}$  совпадает с тройной осью и быть отличной от нуля при некоторых других направлениях  $\vec{k}$ . Висмут напылялся на подложку из монокристалла кремния или слюды по технологии, описанной в [8]. Пленки висмута имели преимущественную ориентацию по двойной оси в направлении нормали к плоскости пленки на подложках из кремния и были строго ориентированы по тройной оси в направлении нормали к пленке на подложках из слюды. Площадь пленок была  $\sim 3,5 \times 6$  мм<sup>2</sup>, а их толщина  $d \leq 0,3$  мкм. Электрические контакты наносились в направлении  $x$  (рис. 1). В опытах с пленками висмута на кремнии использовалось как наклонное (рис. 1), так и нормальное падение света. Угол  $\gamma$  устанавливался равным либо  $75^\circ$ , либо  $-75^\circ$  для каждого образца. При этих углах лазерный луч испытывал полное внутреннее отражение на границе висмут — вакуум (рис. 1). На образцах висмута на слюде исследовалось увлечение

<sup>1)</sup> При интенсивностях света  $I_0 \gtrsim 0,5$  Мвт/см<sup>2</sup> в висмуте наблюдаются паразитные фотоэдс, которые в наших опытах можно было легко отличить от ЭДС увлечения. Паразитные фотоэдс были затянuty по сравнению с лазерным импульсом на время  $t \sim (20 \div 100) \cdot 10^{-9}$  сек и их величина  $V$  зависела от интенсивности света при  $I_0 \gtrsim 0,5$  Мвт/см<sup>2</sup> как  $V \sim I_0^{2,0 \div 2,5}$ . Механизм образования этих фотоэдс пока не ясен. Экспериментальные результаты, описанные ниже были получены при  $I_0 < 0,5$  Мвт/см<sup>2</sup>.

только при нормальном падении света. Измерения проводились в интервале температур от 300 до 77,3К.

При наклонном падении света на образец висмута, нанесенный на кремний, на контактах генерировалась быстрая ЭДС, которая полностью повторяла форму лазерного импульса. Переход от  $TM$ -волны к  $TE$ -волне приводил к уменьшению ЭДС  $V_x$  в соответствии с коэффициентом отражения для этих типов волн. ЭДС  $V_x$  линейно зависела от интенсивности света. При смене угла  $\gamma$  с  $75^\circ$  на  $-75^\circ$  ЭДС  $V_x$  изменяла только знак. При понижении температуры (рис. 2) от 300 до 77,3К ЭДС  $V_x$  дважды изменяла знак для  $\lambda \approx 10,6$  мкм и один раз для  $\lambda \approx 9,54$  мкм. Наиболее сильно спектральная зависимость  $V_x$  проявляется вблизи температуры инверсии, в окрестности которой для рядом расположенных вращательных линий излучения лазера  $V_x$  имеет противоположный знак. В случае нормального падения света на пленку висмута при  $T \sim 300$ К возникала поперечная по отношению к  $\vec{k}$  ЭДС, которая в зависимости от угла поворота  $\phi$  между вектором поляризации света и направлением между контактами изменялась как  $\cos 2\phi$ . Амплитуда поперечной ЭДС была на порядок меньше, чем величина  $V_x$  при наклонном падении при той же температуре. В образцах висмута на слюде поперечная ЭДС  $V_x$  была равна нулю. Наблюдаемый вид угловой [4] и температурной [1] зависимости ЭДС  $V_x$ , а также другие полученные результаты определенно доказывают, что быстрая ЭДС  $V_x$  возникает вследствие передачи импульса света системе носителей заряда в висмуте в процессе поглощения света. Излучение  $CO_2$ -лазера поглощается независимо электронами и дырками при внутрizonных переходах и при прямых межзонных переходах в висмуте, и можно показать [1], что в каждом из этих взаимодействий образуются два противоположно направленных потока носителей, энергии которых отличаются на величину кванта света. Каждый из потоков неодинаковым образом зависит от температуры, вследствие чего зависимость ЭДС увлечения от температуры оказалась сложной и зависящей от энергии кванта. Из знака  $V_x$  (рис. 2) следует, что при  $T \sim 300$ К электроны в висмуте увлекаются в направлении  $\vec{k}$ .

Обнаруженный эффект увлечения в полуметаллах может представлять интерес в связи с возможностью его практического использования в ближней инфракрасной и видимой областях спектра, а также ожидаемой возможностью регистрации резонансного возрастания тока увлечения [7, 9, 10] в области плазменного минимума отражения в металлах.

Физико-технический институт  
им. А.Ф.Иоффе  
Академии наук СССР

Поступила в редакцию  
27 сентября 1976 г.  
После переработки  
17 декабря 1976 г.

### Литература

- [1] А.М.Данишевский, А.А.Кастальский, С.М.Рывкин, И.Д.Ярошецкий. ЖЭТФ, 58, 544, 1970.
- [2] A. F. Gibson, M. E. Kimmif, A. C. Walker. Appl. Phys. Lett., 17, 75, 1970.

- [ 3 ] П.М.Валов, А.М.Данишевский, И.Д.Ярошецкий. ЖЭТФ, 59, 722, 1970.
- [ 4 ] П.М.Валов, Б.С.Рывкин, С.М.Рывкин, Е.В.Титова, И.Д.Ярошецкий. ФТП, 6, 123, 1972.
- [ 5 ] В.Г.Агафонов, П.М.Валов, Б.С.Рывкин, И.Д.Ярошецкий. ФТП, 7, 2316, 1973.
- [ 6 ] Г.А.Аскарьян, М.С.Рабинович, А.Д.Смирнова, В.Б.Студенов. Письма в ЖЭТФ, 5, 116, 1967.
- [ 7 ] Л.Н.Курбатов, Г.Н.Романов, С.С.Шахиджанов. ФТП, 10, вып. 11, 1976.
- [ 8 ] И.С.Лискер. Вычислительные системы. Изд. СО АН СССР, 1968, вып. 29, стр. 89.
- [ 9 ] Ю.В.Гуляев. Радиотехника и электроника, 13, 688, 1968.
- [ 10 ] Л.Э.Гуревич, О.А.Мезрин. ЖЭТФ, 62, 2255, 1972.
-