

С. М. РЫВКИН

КОМПЛЕКСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ФОТОПРОВОДИМОСТИ ЗАКИСИ МЕДИ

(Представлено академиком А. Ф. Иоффе 16 VII 1949)

1. Фотопроводимость является примером сложного явления, которое включает в себя ряд более простых процессов и определяется характером поглощения света, а также подвижностью и продолжительностью жизни носителей фототока.

Легко показать, что стационарное значение фотопроводимости, достигаемое при достаточно длительном освещении, может быть представлено произведением ряда параметров, каждый из которых характеризует какую-либо одну сторону явления:

$$\Delta\sigma_{\text{стац}} = eu\tau k\beta I. \quad (1)$$

Здесь $\Delta\sigma_{\text{стац}}$ — стационарная фотопроводимость, e — заряд электрона, u и τ — соответственно, подвижность и время жизни носителей фототока, k — коэффициент поглощения, I — интенсивность света, β — коэффициент фотоэффекта (если I измерять числом квантов в секунду, то β имеет смысл так называемого „квантового выхода“).

Обычно при изучении фотоэлектрических свойств полупроводников исследуется сложная величина стационарной фотопроводимости, наиболее просто поддающаяся измерению. Однако интерпретация получаемых при этом результатов часто бывает затруднена или невозможна, так как а priori неизвестно, какая или какие из величин, входящих в выражение (1), играют существенную роль в условиях данного опыта. Поэтому всякое полное изучение фотопроводимости не может ограничиваться исследованием стационарной фотопроводимости, без отдельного исследования всех величин, входящих в (1).

Именно такому комплексному исследованию фотопроводимости посвящена настоящая работа.

Следует отметить, что для достаточно толстых образцов (толщина $d \gg 1/k$), при линейном законе рекомбинации носителей фототока и, наконец, при перпендикулярной ориентации светового пучка и электрического поля коэффициент поглощения k из выражения для стационарной фотопроводимости выпадает, и оно может быть переписано в виде:

$$\Delta\sigma_{\text{стац}} = Leu\tau\beta I, \quad (2)$$

где L — коэффициент, зависящий от размеров образца.

Нашей основной задачей являлось исследование температурной зависимости величин, входящих в (2), для закиси меди. Поскольку температурная зависимость подвижности в Cu_2O достаточно подробно исследована (1) и оказалась сравнительно слабой ($u \sim T^{-3/2}$) и так как

нет оснований предполагать, что подвижность носителей тока, созданных светом и теплом, может существенно различаться ⁽²⁾, задача могла быть ограничена исследованием температурной зависимости времени жизни τ , квантового выхода β и стационарной фотопроводимости $\Delta\sigma_{\text{стац}}$.

2. Для исследования всех этих величин был использован метод освещения прямоугольными волнами света (продолжительность импульсов света равна продолжительности темновых промежутков между ними), кратко описанный ранее ⁽³⁾.

Этот метод при некотором изменении условий позволяет практически одновременно измерять все три интересующие нас величины. Действительно, как было нами показано, при линейном законе рекомбинации измеряемая на опыте при освещении прерывистым светом величина — переменная составляющая фотопроводимости $\Delta\sigma_{\sim}$ — может быть записана в виде:

$$\Delta\sigma_{\sim} = \Delta\sigma_{\text{стац}} \operatorname{th} \frac{t_1}{2\tau}, \quad (3)$$

или, иначе,

$$\Delta\sigma_{\sim} = \Delta\sigma_{\text{стац}} \operatorname{th} \frac{1}{4\tau f}. \quad (4)$$

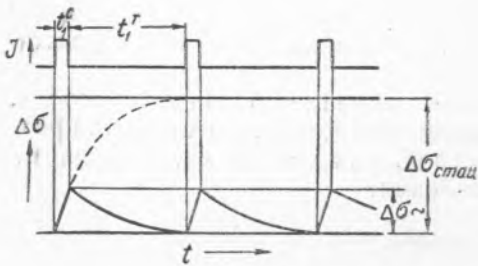


Рис. 1

Здесь t_1 — продолжительность импульса, f — частота прерывания света.

Снимая экспериментально частотную зависимость $\Delta\sigma_{\sim}$ и используя (3) и (4), легко графическим методом определить τ .

Для измерения $\Delta\sigma_{\text{стац}}$ необходимо выполнение условия $t_1 \gg \tau$. Действительно, при этом $\operatorname{th} \frac{t_1}{2\tau} \rightarrow 1$, и измеряемая на опыте величина $\Delta\sigma_{\sim} \rightarrow \Delta\sigma_{\text{стац}}$.

Непосредственное исследование квантового выхода в полупроводниках до сих пор не могло быть проделано из-за отсутствия соответствующей методики. Известный для изолирующих кристаллов метод определения квантового выхода по измерению фототока насыщения к полупроводникам не применим, так как достижение в них фототока насыщения практически невозможно ^(4,5).

Основная идея предлагаемого нами метода заключается в следующем.

Наблюдаемое на опыте повышение проводимости при освещении есть результат противоположного действия двух процессов: процесса создания светом носителей фототока и обратного процесса их рекомбинации.

Если каким-либо способом исключить действие второго процесса, то, зная в любой момент наличное число носителей фототока, время от момента начала освещения и интенсивность света, легко определить квантовый выход. Исключить влияние рекомбинации можно, если изучать лишь начальные стадии изменения фотопроводимости во времени, т. е. те близкие к моменту начала освещения стадии процесса, на которых еще не сказывается рекомбинация (интенсивность рекомбинации мала при малой концентрации носителей фототока). Если освещать образец короткими по сравнению с τ импульсами света t_1^f , отделенными длительными по сравнению с τ промежутками t_1^r (см. рис. 1), то фотопроводимость будет меняться во времени по кривой, изобра-

женной на рис. 1 снизу, и измеряемая на опыте величина $\Delta\sigma_{\sim}$, отнесенная к продолжительности светового импульса t_1^c , оказывается пропорциональной произведению квантового выхода и подвижности.

Тот же результат для случая линейной рекомбинации может быть получен при освещении прямоугольными волнами света ($t_1^c = t_1^T = t_1$), если $t_1 \ll \tau$. Действительно, из (3) имеем, что при $t_1 \ll \tau$ $\Delta\sigma_{\sim} \rightarrow \Delta\sigma_{стак} \frac{t_1}{2\tau}$, или, после подстановки вместо $\Delta\sigma_{стак}$ его выражения из (2),

$$\Delta\sigma_{\sim} = \text{const } u\beta.$$

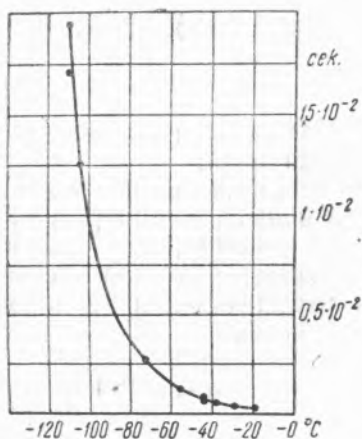


Рис. 2

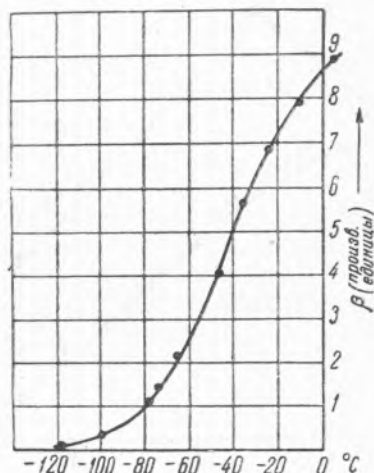


Рис. 3

В настоящей работе исследовалась лишь температурная зависимость квантового выхода. Определение его абсолютного значения, представляющее исключительный интерес для суждения о механизме фотопродоводности, нами не производилось. Такое определение, связанное с точными спектрофотометрическими измерениями и измерением подвижности носителей фототока, является предметом дальнейших исследований.

Нами исследована закись меди, полученная обычным способом, без какой-либо специальной обработки. Как известно (^{6,3}), такой Si_2O присущ линейный характер рекомбинации и зависимости фотопродоводности от интенсивности света*.

3. Измерения температурной зависимости τ , β и $\Delta\sigma_{стак}$ для Si_2O привели к следующим результатам.

Время жизни носителей фототока с понижением температуры резко возрастает (рис. 2), а квантовый выход, напротив, уменьшается (рис. 3). На рис. 4 те же данные представлены в логарифмических координатах. На том же рисунке приведена температурная зависимость темновой проводимости σ . Из рис. 4 видно, что между температурными зависимостями темновой проводимости, с одной стороны, и квантового выхода и времени жизни, с другой, существует определенная связь, проявляющаяся в близости абсолютных значений наклонов соответствующих кривых, построенных в логарифмическом масштабе. В табл. 1 для нескольких образцов даны абсолютные значения наклонов σ , β

* Случай нелинейной фотопродоводности в Si_2O недавно исследован В. Е. Лашкаревым и Г. А. Федорусом (⁷).

(в области низких температур) и τ , которые для удобства выражены в электрон-вольтах. Как видно из табл. 1, совпадение наклонов для каждого образца достаточно близкое.

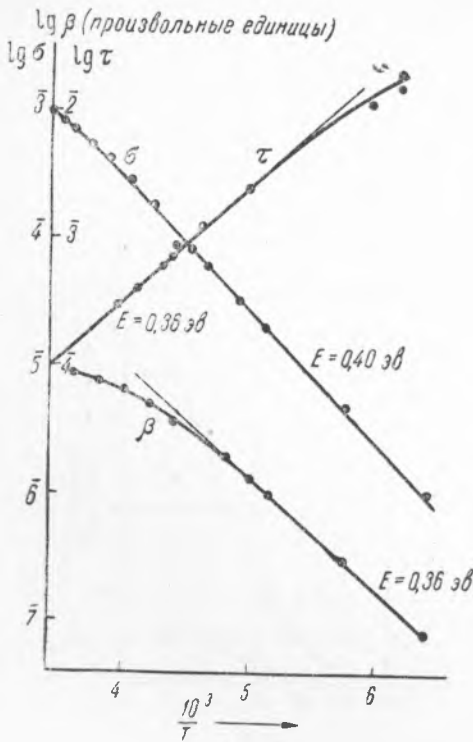


Рис. 4

Таблица 1

№ образца	Наклон (E) в эВ		
	τ	τ	β
1	0,54	—	0,49
2	0,49	0,52	0,49
3	0,45	0,51	0,46
4	0,40	0,36	0,36
5	0,32	0,32	0,28
6	0,30	—	0,30

Из сказанного следует, что в закиси меди:

а) время жизни возрастает с уменьшением температуры по закону $\sim e^{E/2kT}$, где значение E совпадает с работой диссоциации в выражении для темновой проводимости

$$\sigma \sim e^{-E/kT};$$

б) температурная зависимость квантового выхода β может быть разбита на две области: „низкотемпературную“ (ниже $\sim 40^\circ$), в

которой β спадает по тому же закону, что и темновая проводимость, т. е.

$$\beta \sim e^{-E/2kT},$$

и „высокотемпературную“, где зависимость от температуры становится менее резкой и в пределе исчезает;

в) стационарная фотопроводимость в „высокотемпературной“ области возрастает в большинстве случаев по закону

$$\Delta\sigma_{\text{стац}} \sim e^{E/2kT}.$$

В „низкотемпературной“ области $\Delta\sigma_{\text{стац}}$ изменяется незначительно (слегка спадает).

Время жизни носителей фототока в Si_2O , полученное экстраполяцией температурной зависимости в область комнатных температур, колеблется для разных образцов от $1,3 \cdot 10^{-4}$ до $5 \cdot 10^{-5}$ сек.

Автор выражает глубокую признательность В. П. Жузе за руководство работой и акад. А. Ф. Иоффе за ценные указания.

Ленинградский физико-технический институт
Академии наук СССР

Поступило
13 VII 1949

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ E. Engelhard, Ann. d. Phys., 17, 501 (1933). ² Б. И. Давыдов, ЖТФ, 7, 2212 (1937). ³ В. П. Жузе и С. М. Рывкин, ДАН, 58, 1629 (1947). ⁴ А. В. Иоффе и А. Ф. Иоффе, ЖЭТФ, 9, 1428 (1939). ⁵ А. В. Иоффе и А. Ф. Иоффе, ЖЭТФ, 9, 1451 (1939). ⁶ V. Schonwald, Ann. d. Phys., 15, 395 (1932). ⁷ В. Е. Лашкарев и Г. А. Федорус, ДАН, 64, 195 (1939).