

06;12

## Особенности фотопроводимости хлопковых волокон с примесью йода при освещении собственной полосой поглощения

© А.Т. Мамадалимов, Б.Л. Оксегендлер, Ш.О. Отажонов,  
Б.Э. Тураев, Т.А. Усманов, Н.К. Хакимова, Ж.А. Кадиров

Национальный университет Узбекистана им. М. Улугбека, Ташкент  
E-mail: mamadalimov@yahoo.com

Поступило в Редакцию 17 января 2002 г.

Проведено исследование фотоэлектрических свойств хлопковых волокон (ХВ), обработанных йодом, в области собственного поглощения. Обнаружены сублинейная люкс-амперная характеристика и долговременная релаксация фотопроводимости после освещения ХВ, легированного йодом, ультрафиолетовым светом с  $h\nu = 5 \text{ eV}$ . Предложен механизм фотопроводимости, объясняющий нелинейную зависимость фототока от освещения и спад фотопроводимости по бимолекулярному закону после освещения ХВ с йодом собственной полосой поглощения.

В полупроводниках с резкой асимметрией сечений захвата электронов ( $S_n$ ) и дырок ( $S_p$ ) на глубокий уровень зависимость фототока от интенсивности освещения может быть нелинейной при освещении светом с  $h\nu \geq E_g$  ( $E_g$  — ширина запрещенной зоны полупроводника) [1–3]. В [4] изучена температурная зависимость электропроводности хлопковых волокон (ХВ) и высказано предположение о возможности проявления полупроводниковых свойств. Однако фотоэлектрические свойства ХВ, легированного различными примесями, практически не изучены.

Целью данной работы является изучение закономерности фотопроводимости (ФП) ХВ, легированных йодом, при их освещении светом собственной полосы поглощения.

Рассмотрим полупроводник с одним глубоким донорным уровнем в верхней половине запрещенной зоны с энергией ионизации  $E_t$  и концентрацией  $M$ . Если уровень Ферми  $E_F$  расположен ниже уровня  $E_t$ ,

то этот уровень заряжен положительно. Сечения захвата носителей заряда на такой уровень, особенно при низких температурах, могут отличаться на несколько порядков, причем  $S_n \gg S_p$  и  $S_n \gg S_{nr}$  ( $S_{nr}$  — сечения захвата электронов на уровни неконтролируемых примесей) [3].

Введение глубоких донорных примесей (в том числе многозарядных) в полупроводник с дырочной проводимостью приводит к резкому уменьшению  $\tau_n$  и возрастанию  $\tau_p$  ( $\tau_n$ ,  $\tau_p$  — время жизни электронов и дырок соответственно). Это приводит к тому, что при освещении полупроводника светом с  $h\nu \geq E_g$  практически все неравновесные электроны захватываются на положительно заряженные донорные уровни и неконтролируемые уровни не принимают участия в процессе рекомбинации. Поскольку  $\tau_p$  велико (малое сечение захвата дырок на положительно заряженные глубокие донорные уровни), то происходит накопление дырок в валентной зоне. Следовательно, ФП определяется неравновесной концентрацией фотодырок, образовавшихся в результате освещения полупроводника светом из области собственной полосы поглощения. Общая фоточувствительность повышается, т. е. происходит очувствление материала. В этом случае полная концентрация дырок  $p$  будет определяться уравнением

$$\chi IM = \alpha_p m p, \quad (1)$$

где  $\chi$  — сечение фотоионизации при оптическом переходе,  $I$  — интенсивность света в  $\text{quant}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ,  $m$  — концентрация электронов на уровнях  $M$ ,  $\alpha_p = V_p S_p$ ,  $V_p$  — тепловая скорость дырок. Если ФП определяется только перезарядкой уровня  $E_t$  и термической генерацией с данного уровня можно пренебречь, то можно считать  $m = \Delta p = p - p_t$ , где  $p_t$  и  $\Delta p$  — концентрации равновесных и неравновесных дырок. Тогда мы имеем

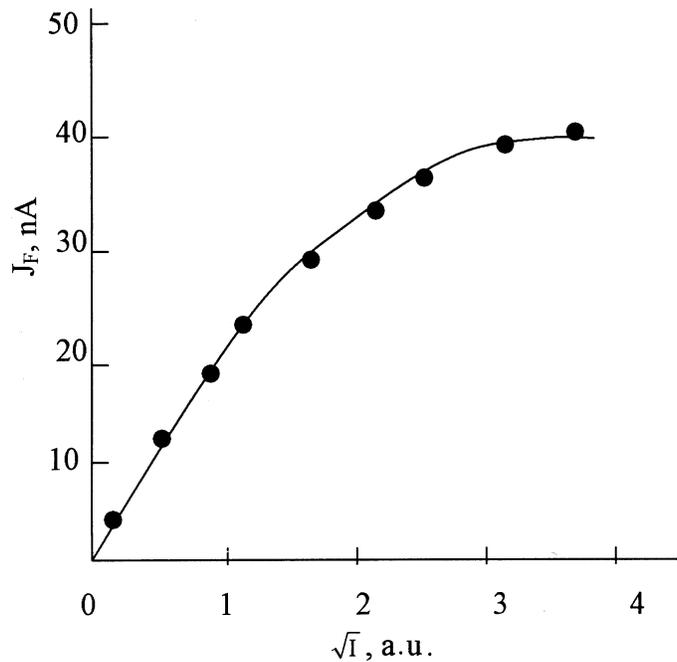
$$\chi IM = \alpha_p (p^2 - p p_t). \quad (2)$$

В высокоомных образцах при малых интенсивностях света выполняется условие  $p \gg p_t$ , тогда

$$\Delta p = \sqrt{\chi IM / \alpha_p} \sim \sqrt{I}. \quad (3)$$

Спад ФП определяется уравнением

$$dp/dt = -\alpha_p p (p - p_t). \quad (4)$$



**Рис. 1.** Люкс-амперная характеристика ХВ сорта „Голиб“, легированного йодом.  $T = 300$  К,  $U = 100$  В.

Решение его при начальных условиях  $p = p_m$  при  $t = 0$  и  $p_t/p_m < p_t/p \ll 1$  имеет вид [5]:

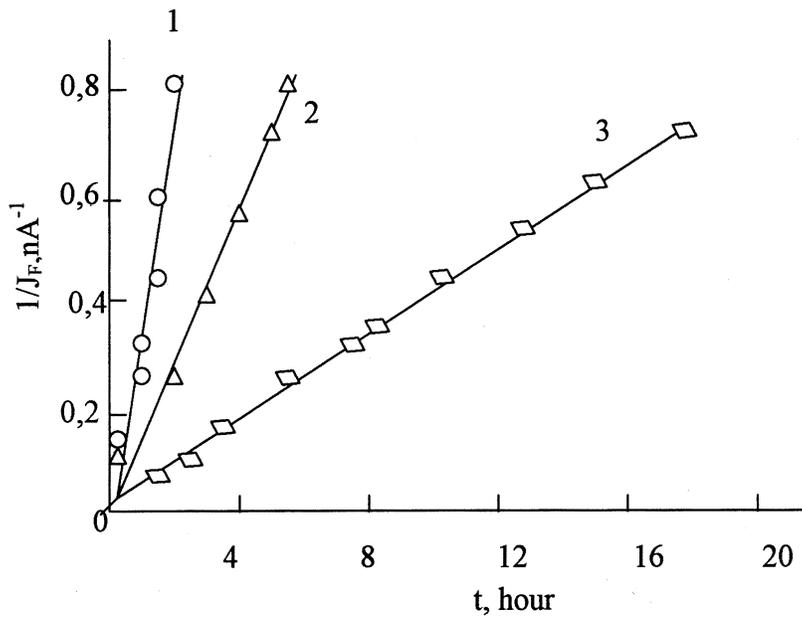
$$1/p = 1/p_m - \alpha_p t, \quad (5)$$

$$p = p_m / (1 - \alpha_p t p_m), \quad (6)$$

т.е. спад ФП после выключения света с  $h\nu \geq E_g$  происходит по бимолекулярному закону.

Представляет интерес применение развитых выше соображений к экспериментальным результатам, полученным в ХВ с примесью йода.

Образцы для измерения изготавливались в виде пучка из предварительно причесанных и очищенных ХВ сорта „Голиб“, уложенных параллельно друг другу, общим количеством волокон  $\approx 7000$  шт.,



**Рис. 2.** Кинетика спада ФП ХВ сортов „Хазина“ (1), „Голиб“ (2) и 175Ф (3), легированного йодом, после освещения светом собственной полосой поглощения ( $h\nu = 5 \text{ eV}$ ) в координатах  $J_F^{-1} = f(t)$ .  $T = 300 \text{ K}$ ,  $U = 100 \text{ V}$ .

пропитанных 10%-ным спиртовым раствором йода при  $t = 50^\circ\text{C}$  в течение 10 h и высушенных в термостате при  $100^\circ\text{C}$  в течение 30 min (образцы типа А). Одновременно были изготовлены аналогичные образцы, но без обработки йодом (образцы типа Б). Длина образцов составляла  $\approx 10 \text{ mm}$ . Эксперименты показывают, что в образцах типа А электропроводность в интервале температур  $20\text{--}120^\circ\text{C}$  возрастает по экспоненциальному закону с энергией активации  $E_t = 0.77 \text{ eV}$ . Однако в образцах типа А электропроводность в  $10^2\text{--}10^3$  раз больше, чем образцов типа Б.

Были изучены спектры ФП ХВ сорта „Голиб“ с примесью йода. Эксперименты показывают, что длинноволновая граница ФП расположена при  $h\nu \approx 0.78 \text{ eV}$ , что хорошо согласуется с энергией ионизации, полученной по температурной зависимости электропроводности.

В спектрах ФП также наблюдались резкое уменьшение фототока при  $h\nu = 2.42 \text{ eV}$  и увеличение при  $h\nu = 3.2 \text{ eV}$ . Это, по-видимому, связано с тем, что йод в ХВ создает глубокий донорный уровень с  $E_i = E_C - 0.78 \text{ eV}$  и ширина запрещенной зоны ХВ составляет  $E_g = 0.78 + 2.42 = 3.2 \text{ eV}$ .

На рис. 1 приведена экспериментальная зависимость фототока от интенсивности падающего ультрафиолетового (УФ) света с  $h\nu = 5 \text{ eV}$  для образцов ХВ сорта „Голиб“, легированного йодом. Как видно из рисунка, при малых интенсивностях света хорошо выполняется зависимость  $J_F \sim \Delta p \sim \sqrt{I}$ , что согласуется с выражением (3). При увеличении интенсивности света донорный уровень йода в ХВ заполняется, эффективное время жизни падает и на зависимости  $J_F = f(\sqrt{I})$  наблюдается насыщение фототока.

Кинетика спада ФП изучалась в образцах ХВ сортов 175Ф, „Хазина“ и „Голиб“, легированных йодом. Спад ФП хорошо укладывается в закон бимолекулярной рекомбинации (рис. 2). Отметим, что ранее такой спад ФП наблюдался в кремнии, компенсированном примесями серы и палладия [5,6].

То обстоятельство, что кинетика ФП хорошо описывается простым бимолекулярным законом, ведет к еще одному качественно важному выводу. ХВ по своей структуре состоит из совокупности строго периодических кристаллических и аморфных областей [7]. Если бы электрон-ионные процессы, связанные с атомами йода, затрагивали аморфные области, то кинетика изучаемых процессов имела бы вид закона Кольрауша  $f(t) = \text{const} \cdot \exp[-(t/\tau)^\beta]$ , где  $0 < \beta < 1$  [8]. Поскольку это не так, то приходим к выводу, что примесь йода располагается в кристаллической области ХВ.

## Список литературы

- [1] Рывкин С.М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Физматгиз, 1963. 496 с.
- [2] Лебедев А.А., Мамадалимов А.Т., Султанов Н.А. // ФТП. 1971. Т. 5. В. 12. С. 2277–2280.
- [3] Мамадалимов А.Т., Лебедев А.А., Астрова Е.В. Спектроскопия глубоких центров в полупроводниках. Ташкент: Университет, 1999. 164 с.
- [4] Шерматов М., Мамадалимов А.Т., Усманов Т.А., Шерматов Ш.М. // Докл. АН РУз. 1995. N 4. С. 21–22.

- [5] *Лебедев А.А., Султанов Н.А., Тучкевич В.М.* // ФТП. 1971. Т. 5. В. 1. С. 31–38.
- [6] *Лебедев А.А., Юнусов М.С., Мамадалимов А.Т., Турсунов Н.А.* // ФТП. 1974. Т. 8. В. 4. С. 691–693.
- [7] *Алиев М., Бекмухамедов А.* Хлопок и его продукция. Ташкент: Укитувчи, 1991. 336 с.
- [8] *Фракталы в физике.* // Под ред. Пьетронеро Л., Тозатти Э. М.: Мир, 1988. 672 с.