

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

ВНУТРЕННИЙ ФОТОЭФФЕКТ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Учебно-методическое пособие для вузов

Составители:
Л.Н. Владимирова,
Е.Н. Бормонтов,
Е.Н. Берло

Издательско-полиграфический центр
Воронежского государственного университета
2009

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ В ОДНОРОДНЫХ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ КРИСТАЛЛАХ

Фотоэлектрические эффекты (фотоэффекты) связаны с изменениями электрических свойств полупроводников под воздействием электромагнитного излучения. В кристаллах может наблюдаться как внешний, так и внутренний фотоэффект. Внешний фотоэффект определяется эмиссией электронов из вещества в вакуум под действием квантов света. Эмиттированные электроны затем могут быть собраны анодом. На этом явлении основан принцип действия таких приборов, как вакуумные фотоэлементы, фотоэлектронные умножители, электронно-оптические преобразователи и т. д.

В случае внутренних фотоэффектов носитель заряда (электрон или дырка) под воздействием кванта света не выходит из полупроводника, а лишь переходит в более высокое энергетическое состояние (например, из валентной зоны в зону проводимости). При этом первичным процессом является поглощение фотона (собственное, решеточное, примесное, экситонное, поглощение свободными носителями заряда). Однако не все механизмы поглощения в одинаковой мере приводят к изменению электрических свойств кристаллов. Действительно, удельная электрическая проводимость

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p)$$

зависит от концентрации и подвижности свободных носителей заряда. Из указанных процессов поглощения только собственное и примесное поглощения приводят непосредственно к изменению концентрации свободных носителей заряда, так как они обусловлены переходами электронов (дырок) под действием квантов света из основного состояния в свободное. Именно эти процессы поглощения дают наибольший вклад в фотоэффект и называются фотоэлектрически активными.

Рассмотрим уравнение непрерывности (1) при условии $\vec{j}_p = \vec{j}_n \approx 0$.

В стационарном состоянии $\frac{dn}{dt} = \frac{dp}{dt} = 0$, и уравнения (1) и (1a) имеют простое и наглядное решение:

$$\Delta p_{CT} = p - p_0 = G_p \tau_p \quad (5)$$

$$\Delta n_{CT} = n - n_0 = G_n \tau_n, \quad (5a)$$

где G_p и G_n – скорости генерации дырок и электронов соответственно.

Таким образом, в отсутствие тока через образец стационарная концентрация избыточных носителей заряда равна числу носителей, освобождаемых светом в единицу времени в единице объема, умноженному на среднее время их существования в зоне до рекомбинации (время жизни). Выражения (5) и (5a) носят название **первого характеристического соотношения** для фоторезистивного эффекта. Поскольку величина фотопроводимости

$$\Delta \sigma_{CT} = e \mu_p (\Delta p_{CT} + b \Delta n_{CT}) = e \mu_p (G_p \tau_p + b G_n \tau_n), \quad (6)$$

где $b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$, то первое характеристическое соотношение фактически определяет

зависимость стационарной фотопроводимости от длины волны падающего света (λ) (область спектра) и его интенсивности (J) через $G(\lambda, J)$ и $\tau(\lambda, J)$.

Скорость генерации зависит от λ и J непосредственно, а τ – посредством зависимости времени жизни от избыточной концентрации, которая в свою очередь зависит от скорости генерации. Скорость генерации G определяется интенсивностью света J и **коэффициентом поглощения** α . Пусть на единицу поверхности слоя вещества толщиной dz , имеющего коэффициент поглощения α , падает свет интенсивности J . Тогда количество световой энергии, поглощаемой в единицу времени в единице объема этого вещества, будет

$$-\frac{dJ}{dz} = \alpha J. \quad (7)$$

Следовательно, количество избыточных электронов и дырок, которое образуется при поглощении квантов света с энергией $\hbar\omega$ в единице объема полупроводника в единицу времени для области собственного поглощения, называемое **скоростью генерации**, будет равно:

$$G = \frac{\beta\alpha J}{\hbar\omega}. \quad (8)$$

Коэффициент пропорциональности β обычно называют **квантовым выходом фотоэффекта**. Он определяет число пар носителей заряда (или число носителей заряда при примесной фотопроводимости), образуемых одним поглощенным фотоном.

С учетом соотношения (8) выражение (6) для стационарной фотопроводимости запишется следующим образом:

$$\Delta\sigma_{CT} = e\beta\alpha(\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p)\frac{J}{\hbar\omega}. \quad (9)$$

Отношение фотопроводимости $\Delta\sigma$ к интенсивности света J определяет **удельную фоточувствительность** полупроводника

$$S_\phi = \frac{\Delta\sigma}{J}. \quad (10)$$

Если один из членов в скобках соотношения (9) значительно больше другого, то фотопроводимость определяется носителями заряда одного знака, и ее называют **монополярной**. В этом случае

$$\Delta\sigma_{CT} = e\beta\alpha\tau\mu\frac{J}{\hbar\omega}. \quad (11)$$

Выражение для стационарного значения плотности фототока будет иметь вид:

$$j_\phi = \Delta\sigma_{CT}E = e\beta\alpha(\mu_n\tau_n + \mu_p\tau_p)\frac{JE}{\hbar\omega}. \quad (12)$$

Если через l обозначить размер образца в направлении поля и через V – дрейфовую скорость, то $\mu_p E = V_p$, $\mu_n E = V_n$, а времена дрейфа электронов и дырок через образец будут $t_n = \frac{l}{\mu_n E}$ и $t_p = \frac{l}{V_p} = \frac{l}{\mu_p E}$.

Тогда, выразив значение напряженности поля через времена дрейфа $E = \frac{l}{\mu_p t_p} = \frac{l}{\mu_n t_n}$ и подставив это значение E в (12), получим:

$$j_\Phi = e\beta\alpha\left(\frac{\tau_n}{t_n} + \frac{\tau_p}{t_p}\right)\frac{Jl}{\hbar\omega}. \quad (13)$$

Умножим выражение (13) на площадь поперечного сечения полупроводника S и учтем, что $S \cdot l = V$ есть объем полупроводника, а $j_\Phi S = J_\Phi$ – фототок. Тогда выражение для фототока можно записать

$$J_\Phi = e\beta\alpha\left(\frac{\tau_n}{t_n} + \frac{\tau_p}{t_p}\right)\frac{JV}{\hbar\omega}. \quad (14)$$

Величина

$$A = \left(\frac{\tau_n}{t_n} + \frac{\tau_p}{t_p}\right) \quad (15)$$

носит название **коэффициента усиления**. Выражение для фототока (14) называется **вторым характеристическим соотношением** для фоторезистивного эффекта. Если, кроме β , все величины, входящие в (14), известны, то, измеряя J_Φ , можно определить квантовый выход.

Пусть теперь полупроводник освещается импульсом света, как это показано на рис. 2а. В этом случае при включении света стационарное значение фотопроводимости достигается не мгновенно, а лишь через некоторое время после начала освещения. Аналогично при выключении света не-