

УДК 537.9

*Р. Р. Батыршин, И. С. Лакунов, С. В. Щегольков\**

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ НА «НАСЫЩЕНИЕ ПОГЛОЩЕНИЯ»

Изучение взаимодействия света с полупроводниками является одним из важных вопросов современной физики. Создание мощных источников когерентного оптического излучения, а также полупроводниковых лазеров сделало данную проблему еще более актуальной и стимулировало развитие нового направления по исследованию взаимодействия полупроводников с сильным одночастотным электромагнитным полем. Одним из важнейших эффектов сильного поля является эффект насыщения поглощения, т.е. ослабления поглощения с ростом поля.

Описание взаимодействия полупроводника с сильным электромагнитным полем возможно с использованием замкнутой системы скоростных уравнений, представляющей собой уравнения для плотности фотонов  $N_\Omega$  и концентрации электронов  $\bar{f}$ [1]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial N_\Omega}{\partial t} &= -\alpha(\bar{f}, \Omega)N_\Omega - \frac{N_\Omega}{\tau_0}; \\ \frac{\partial \bar{f}}{\partial t} &= \alpha(\bar{f}, \Omega)N_\Omega - \frac{\bar{f}}{\tau_r}.\end{aligned}$$

Здесь  $\tau_0$  – время релаксации носителей заряда;  $\tau_r$  – время рекомбинации неравновесных носителей. В этом приближении неравновесное состояние электронов характеризуется только квазиуровнем Ферми или связанной с ним концентрацией электронов  $\bar{f}$ .

Для определения коэффициента поглощения в сильных полях будем исходить из стационарных уравнений (1) и (2):

---

\* Работа выполнена под руководством начальника цикла боевой подготовки Г. А. Лахно, Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ (учебный и испытательный).

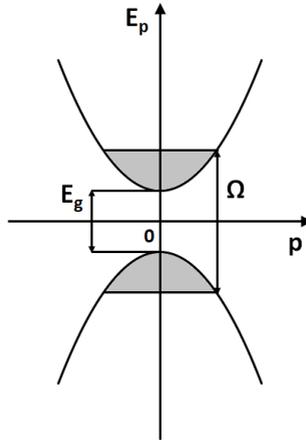
$$\frac{\bar{f}}{\tau_r} = \alpha(\bar{f})N_\Omega;$$

$$\alpha(\bar{f}) = \alpha_0 \left[ 1 - 2f \left( \frac{\Omega}{2} - E_F \right) \right],$$

где  $E_F$  – энергия Ферми.

Толщина образца считается малой, чтобы можно было пренебречь изменением  $N_\Omega$  в пространстве.

Если скорость рождения электронов (дырок)  $\alpha_0 N_\Omega$  превосходит скорость рекомбинации  $\bar{f}/\tau_r$ , то электроны (дырки) начинают заполнять дно  $c$ -зоны (потолок  $v$ -зоны) до квазиуровня Ферми (см. рис. 1) [1].



**Рис. 1. Полупроводник в состоянии насыщения:**

закрашенные области соответствуют неравновесным электронам и дыркам

Когда  $E_F$  приближается к  $\Omega/2$ , функция  $f(\Omega/2 - E_F)$  стремится к  $1/2$ , а  $\alpha(\bar{f})$  – к нулю. Если бы рекомбинация отсутствовала полностью, то поглощение стало бы равно нулю и выполнялись бы соотношения [1]

$$\frac{\Omega}{2} = E_F^{(0)}; f \left( \frac{\Omega}{2} - E_F^{(0)} \right) = \frac{1}{2}; \alpha(\bar{f}, \Omega) = 0.$$

Отсутствие поглощения связано с тем, что числа электронных переходов из  $v$ -зоны в  $c$ -зону и обратно в точности одинаковы, так как

$$f_c \left( \frac{\Omega}{2} - E_F^{(0)} \right) = \frac{1}{2}.$$

Таким образом, эффект насыщения в этом приближении обусловлен заполнением электронами состояний до энергии, соответствующей энергии перехода. Он аналогичен эффекту Бурштейна, но на неравновесных электронах.

Учтем теперь рекомбинацию. Очевидно, что равенства (5) заменяются следующими:

$$\frac{\Omega}{2} \gg \frac{\Omega}{2} - E_F > 0; \quad f\left(\frac{\Omega}{2} - E_F\right) \leq \frac{1}{2}.$$

Концентрация электронов стремится к предельному значению  $\bar{f}_0$  [1]:

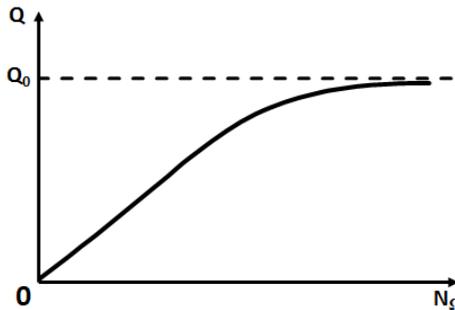
$$\bar{f}_0 = \sum_p f(E_F^{(0)}).$$

Учитывая (3), из (8) находим

$$\alpha = \frac{\bar{f}_0}{\tau_r N_\Omega} \quad \text{при} \quad \alpha_0 N_\Omega \gg \frac{\bar{f}_0}{\tau_r},$$

т.е.  $\alpha$  уменьшается с ростом  $N_\Omega$ :  $\alpha \sim N_\Omega^{-1}$ . Соответственно  $Q$  стремится к постоянному пределу (рис. 2) [1]:

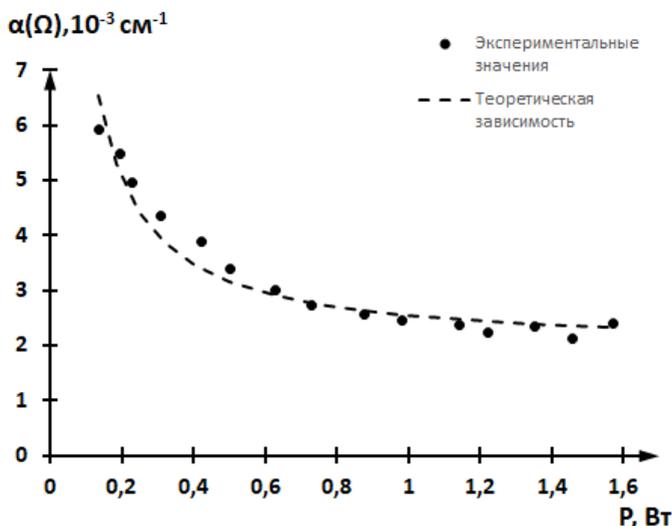
$$Q_0 = \frac{\bar{f}_0}{\tau_r}.$$



**Рис. 2.** Зависимость поглощаемой в единицу времени энергии  $Q$  от плотности фотонов

Для экспериментального исследования зависимости коэффициента поглощения  $\alpha(\Omega)$  от мощности электромагнитного излучения  $P$  использовался GaAs ( $E_g = 1,5$  эВ,  $N_{im} \leq 4 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ ). Эксперимент

проводился на азотном криостате при температуре  $T = 77$  К. В качестве источника использовался GaAsP, частота излучения  $\Omega = 1,5$  эВ, полная мощность источника излучения 1,9 Вт. Площадь облучаемой поверхности  $7,3 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>, а полная мощность составила  $3 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup>. На рисунке 3 представлена зависимость коэффициента поглощения от мощности электромагнитного поля. Видно, что начиная с мощности  $6 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>  $\alpha(\Omega)$  уменьшается в соответствии с выражением (9).



**Рис. 3. Эффект насыщения поглощения – уменьшение коэффициента поглощения  $\alpha$  с ростом мощности  $P$ . Экспериментальные значения представлены черными точками, теоретическая зависимость представлена черной пунктирной линией**

При больших интенсивностях дальнейшее уменьшение  $\alpha$  замедляется из-за начала генерации в облучаемом образце. В ходе эксперимента также измерялась концентрация неравновесных электронов  $\bar{f}$ . После достижения значения  $\bar{f} = 5 \cdot 10^{17}$  см<sup>-3</sup> концентрация оставалась постоянной в соответствии с теорией.

### Список литературы

1. Галицкий, В. М. Резонансное взаимодействие электромагнитных полей с полупроводниками / В. М. Галицкий, В. Ф. Елесин. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 192 с.

2. Spontaneous and stimulated Carrier Lifetime in High-Purity, Surface-Free GaAs Epitaxial Layer / P. Dapkus, H. Holonyak, R. J. Nolson, et al. // J. Appl. Phys. – 1970. – V. 41. – P. 4194 – 4199.

3. Ландау, Л. Д., Квантовая механика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М : Физматгиз, 1963. – 704 с.

*Межвидовой центр подготовки и боевого применения войск РЭБ  
(учебный и испытательный)*