ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ԶԵԿՈՒՅՑՆԵՐ
ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ

Том 91 1990 №1

УДК 621.535.345

ФИЗИКА

К. П. Абгарянц, С. К. Аветисян, А. О. Меликян, Г. Р. Минасян

Двухфотонная ионизация мелких примесей в поле инфракрасного излучения в n-Ge при низких температурах

(Представлено академиком АН Армении М. Л. Тер-Микаеляном 7/V 1990)

При исследовании нелинейного поглощения на длине волны 9,6 мкм в n-Ge при гелиевых температурах и пиковых интенсивностях выше $I_0 \sim 1$ МВт/см^2 было обнаружено насыщение поглощения ([1]). Это явление было интерпретировано в ([1]) как следствие конкуренции двух процессов—фотоионизации и обратного захвата электрона из зоны на донорный уровень. Однако, учитывая лишь указанные два механизма поглощения, авторы работы ([1]) получили при высоких мощностях входящего излучения неудовлетворительное согласие с экспериментом. В работе ([2]) была учтена другая нелинейность, обусловленная непрямыми двухфотонными переходами электрона из минимума L в минимум Г зоны проводимости. Дополнительный учет этого канала поглощения, как показано в ([2]), приводит к уменьшению расхождения теории с экспериментом.

В данной работе рассмотрен новый механизм нелинейности в n—Ge, обусловленный двухфотонной ионизацией примесей, переводящий электрон из связанного состояния непосредственно в минимум Г зоны проводимости. Здесь следует отметить, что для примесей с энергией активации $E_d \sim 10^{-2}$ эВ этот переход энергетически разрешен. Как будет показано ниже, при определенных условиях двухфотонная ионизация может конкурировать с механизмом непрямого поглощения $L \to \Gamma$ ([2]), и поэтому его учет является важным в задачах распространения.

В отличие от двухфотонного непрямого поглощения $L \to \Gamma$, которое рассчитано нами в третьем порядке теории возмущений ([2]), двухфотонная ионизация доноров с переходом электрона в минимум Г может быть рассчитана во втором порядке. Последнее обусловлено тем, что из связанного состояния электрон может оказаться в минимуме Г без взаимодействия с колебаниями решетки. В этом случае малость матричного элемента перехода в основном обусловлена большим переданным квазиимпульсом, поскольку минимум L зоны проводимости Ge расположен на границе зоны Бриллюэна. Из всевозможных промежуточных состояний в двухфотонном переходе электрона энергетически выгодны лишь два: одно в минимуме зоны проводимости и второе в валентной подзоне легких дырок. Однако первый канал поглощения (связанное состояние—минимум L—минимум Г) со-

держит дополнительную малость, связанную с наличием внутризонного матричного элемента импульса P_{LL}, в то время как во втором случае в вероятности перехода будет фигурировать межзонный матричный элемент P_{cv}, который существенно больше, чем P_{LL}. Исходя из этого будем рассматривать второй канал поглощения: связанное состояние—валентная зона—минимум Г зоны проводимости. Во втором порядке нестационарной теории возмущений вероятность рассматриваемой нами двухфотонной ионизации может быть представлена следующим образом:

$$W = \frac{2\pi}{\hbar} N_D \sum_i \sum_{k,k'} \frac{|M_{ci}(k)|^2 |M_{iv}(k)|^2}{(E_i(k') - E_D - \hbar\Omega)^2} \delta(E_c(k) - E_D - 2\hbar\Omega), \qquad (1)$$

где E_D—энергия активации донорной примеси, $\hbar\Omega$—энергия кванта излучения, N_D—концентрация доноров, $E_c(k)$—энергия электрона в прямом минимуме Г зоны проводимости, $E_i(k')$—энергия электрона в i-ом промежуточном состоянии, $M_{ci}(k)$ и $M_{iv}(k')$ матричные элементы перехода, вычисленные на блоховских амплитудах. Как было отмечено выше, из всевозможных промежуточных состояний основной вклад вносит валентная подзона легких дырок ($i = v$), и поэтому двойное суммирование в (1) по квазиимпульсам k и k' заменяется интегрированием по k. Действительно, в поле электромагнитной волны возможны только вертикальные межзонные переходы $v \to c$, так что $k = k'$. Исходя из этого нетрудно получить выражение для W, что и позволяет определить соответствующий коэффициент двухфотонного поглощения

$$\alpha = \frac{2\hbar\Omega W}{I}, \qquad (2)$$

где I—интенсивность излучения. Подставляя проинтегрированное по k выражение для W в (2), легко получить

$$\alpha = \frac{2^8 \sqrt{2}\pi^2 N_D}{\hbar\Omega\sqrt{m_c}} \left(\frac{I^2}{n_0 c\hbar\Omega}\right)^2 \frac{a_Б}{(1 + a_Б^2 k_0^2)^4} \sqrt{2\hbar\Omega - \Delta}\, I. \qquad (3)$$

В выражении (3) $a_Б$—боровский радиус основного донорного состояния, m_c—эффективная масса в минимуе Г зоны проводимости, n_0 показатель преломления, Δ—энергетическое расстояние между минимумами L и Г, k_0—разность квазиимпульсов, соответствующих минимумам энергии зон L и Г. При получении выражения (3) было предположено, что матричные элементы импульса $|P_{cv}(0)|$ и $P_{Dv}(0)|$ приблизительно одинаковы. Это предположение основано на том, что олоховские амплитуды волновых функций электрона $U_k(r)$ периодичны не только по r, но и по k с периодом, равным вектору обратной решетки.

Как это следует из выражения (3), коэффициент двухфотонного примесного поглощения сильно зависит от величины боровского радиуса связанного состояния $\alpha \sim a_Б^{-6}$ и поэтому небольшое изменение $a_Б$ существенно меняет интегральное поглощение. Для сравнения удобно привести отношение α к коэффициенту двухфотонного непрямого поглощения $L \to \Gamma$, α_0 ([8]).

$$\frac{\alpha}{\alpha_0} = \frac{2^8\pi^{9/2}\sqrt{2\hbar\Omega - \Delta}\,(\hbar\Omega)^2}{a_1^2 k_0^2 \sqrt{kTc}}, \qquad (4)$$

где c — константа электрон-фононного взаимодействия, равная $4\cdot10^{-}$ эВ^2 см^3 ([3]). При получении (4) учтено, что $E_g = 3{,}5\Delta$ (E_g — ширин прямой запрещенной зоны) и $a_1 k_0 \gg 1$. Отношение (4) в условия эксперимента ([1]) действительно оказывается порядка единицы. Есл же вместо фосфора, как в ([1]), легировать образцы Ge другими мел кими примесями (например, Te, O, Ag), то α/α_0 может оказаться н порядок больше единицы. Таким образом, рассмотренный выше ка нал двухфотонного поглощения в инфракрасной области может су щественно влиять на нелинейные свойства n—Ge при низких темпе ратурах.

Ереванский политехнический институт
им. К. Маркса

Կ. Պ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Ռ. Կ. ԱՎԵՏԻՍՅԱՆ, Ա. Հ. ՄԵԼԻՔՅԱՆ, Հ. Ռ. ՄԻՆԱՍՅԱՆ

Սանձաղ խառնուրդների երկֆոտոն իոնացումը n–Ge-ում ինֆրակարմիր ճառագայթման դաշտում ցածր ջերմաստիճաններում

Աշխատանքում ուսումնասիրված է ծանծաղ դոնորների երկֆոտոն իոնացումը ինֆրակարմիր տիրույթում n—Ge-ում, երբ էլեկտրոնը կապված վիճակից հայտնվում է հաղորդականության գոտու Γ ուղիղ մինիմումում։ Ստացված է դիտարկվող պրոցեսի հավանականության արտահայտությունը, որի միջոցով գտնված է լույսի երկֆոտոն կլանման գործակիցը։ Ցույց է տրված, որ կլանման դիտարկված ոչ գծային մեխանիզմը երկարալիք տիրույթում կարող է գերակշռել հայտնի մյուս մեխանիզմների նկատմամբ։

ЛИТАРАТУРА — ԳՐԱԿԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

[1] *J. B. Mc Manus, R. People, R. L. Aggarwal*, e. a., J. App'. Phys., v. 52, № 7, p. 4748—4752 (1981). [2] *С. К. Аветисян, Г. Р. Минасян, Р. Л. Энфиаджян*, ФТП, т. 24, № 4, с. 766—768 (1990) [3] *С. К. Аветисян, Г. Р. Минасян*, ФТТ, т. 31, № 5 с. 87—90 (1989).