

ДВОЙНОЙ МЕЖЗОННЫЙ РЕЗОНАНС, КОНТРОЛИРУЕМЫЙ ОПТИЧЕСКИМ ШТАРК ЭФФЕКТОМ, В ШИРОКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ И ДИЭЛЕКТРИКАХ

Рассмотрена многофотонная генерация электронно-дырочных пар в условиях двойного многофотонно-двухфотонного резонанса на смежных межзонных переходах. Показано, что имеется область интенсивностей света j , при которых небольшое возрастание j приводит к скачкообразному увеличению скорости генерации ЭДП, и как следствие, к пробую материала.

Одним из аспектов проблемы оптического пробоя прозрачных широкозонных диэлектриков является генерация электронно-дырочных пар (ЭДП) интенсивным светом с энергией кванта $\hbar\omega$, большой по сравнению с энергиями колебательных возбуждений, но малой по сравнению с шириной запрещенной зоны материала E_g .

Считается, что при возникновении пробоя в чистых прозрачных материалах основную роль играют два механизма генерации электронно-дырочных пар — лавинная ионизация и многофотонные (МФ) межзонные переходы. Помимо указанных механизмов генерация ЭДП может идти за счет процессов промежуточного типа — МФ межзонных переходов с участием в элементарном акте свободных электронов или дырок. В определенных условиях такие процессы могут привести к развитию т. н. фотонной лавины [1,2], в результате которой резкое увеличение концентрации ЭДП (до значений, при которых наступает пробой) происходит при незначительном увеличении интенсивности света j в области значений $j \sim 10^{11} - 10^{13}$ Вт/см². В то же время имеется и другой механизм МФ поглощения, который характеризуется в определенной области интенсивностей света исключительно быстрым увеличением вероятностей переходов. Этот механизм связан с перестройкой электронного зонного спектра кристалла благодаря резонансному оптическому эффекту Штарка [3]. Рассмотрим трехзонную модель кристалла, включающую валентную зону ν , нижнюю зону проводимости c и верхнюю зону проводимости c_1 . Пусть в точке \mathbf{k}_0 зоны Бриллюэна имеет место n -фотонный резонанс между зонами ν и c (например, $n = 4$ или 5). При этом в точке \mathbf{k}_1 в окрестности точки \mathbf{k}_0 , может иметь место l -фотонный резонанс на переходе между зонами c и c_1 ($l < n$, например, $l = 1, 2$ или 3). Случай $n = 2, l = 1$ рассматривался в [4–6]. Было показано, что при однофотонном резонансе между зонами c и c_1 каждая из них расщепляется на две ветви, между которыми возникает щель с шириной, определяемой частотой Раби для перехода $c \rightarrow c_1$. Кроме того, на обеих ветвях каждой из перестроенных зон появляются дополнительные критические точки (сингулярности Ван Хофа) плотности состояний. Положение этих точек в \mathbf{k} -пространстве зависит от интенсивности света j . Если какая-либо из таких критических точек приближается к \mathbf{k}_0 , то происходит резкое (практически, скачкообразное) увеличение вероятности двухфотонного перехода между зонами ν и c . Двойной двухфотонно-однофотонный резонанс на смежных межзонных переходах может реализоваться во многих материалах, в т.ч. в AgVg для света с $\lambda = 560$ нм [6], причем проявления такого резонанса можно наблюдать при значениях интенсивности света j , на два-три порядка ниже порога оптической прочности материала.

Ситуация МФ-двухфотонного резонанса, которая детально изучается в настоящей работе, представляет интерес как раз в случае предпробойных интенсивностей света. Анализ такой ситуации сложнее, чем в случае $n = 2, l = 1$. При $j \sim 10^{12} - 10^{13}$ Вт/см² отношение энергии взаимодействия электронной и фотонной подсистем к энергии кванта $\hbar\omega$ не мало. При этом нельзя для описания n -фотонного перехода ограничиться n -м порядком теории возмущений

по электрон-фотонному взаимодействию и требуется учет процессов высших порядков, т.е. эффектов переизлучения.

Вычисление скорости генерации неравновесных ЭДП в случае многофотонно-двухфотонного резонанса на смежных переходах основано на \hat{S} -преобразовании гамильтониана электронно-фотонной системы \hat{H} :

$$\tilde{H} = \exp(-\hat{S})\hat{H}\exp(\hat{S}), \quad (1)$$

причем оператор \hat{S} выбирается таким образом, чтобы в преобразованном гамильтониане \tilde{H} отсутствовали линейные по фотонным оператором члены. Использование гамильтониана (1) позволило в результате весьма громоздких вычислений: (а) получить вероятности n -фотонной генерации ЭДП при произвольных n в первом порядке по недиагональной по электронным операторам части гамильтониана \tilde{H} ; (б) получить эффекты перестройки энергетического зонного спектра в условиях двойного межзонного резонанса; (в) учесть процессы переизлучения фотонов, в т.ч. при вычислении «двухфотонной частоты Раби».

Показано, что в условиях двойного многофотонно-двухфотонного резонанса на смежных межзонных переходах имеется область интенсивностей света, при которых небольшое возрастание j приводит к скачкообразному увеличению скорости генерации ЭДП, и как следствие, к пробоем материала.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Е.Ю.Перлин, А.В.Иванов, Р.С.Левицкий, ЖЭТФ, 123, № 3, 612-624, (2003).
2. Е.Ю.Перлин, А.В.Иванов, Р.С.Левицкий, ЖЭТФ, 128, № 2, 411-421, (2005).
3. Е.Ю.Перлин, ЖЭТФ, 105, № 1, 186-197 (1994).
4. Е.Ю.Перлин, А.В.Федоров, ФТТ, 37, № 6, 1463-1472, (1995).
5. Е.Ю.Перлин, А.В.Федоров, Опт. и спектр., 78, № 3, 445-456, (1995).
6. Е.Ю.Перлин, Д.И.Стаселько, Опт. и спектр., 98, № 6, 944-950, (2005).