

ВЛИЯНИЕ ГЕНЕРАЦИИ И РЕКОМБИНАЦИИ ЭКСИТОНОВ НА СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ

Влияние экситонов на динамику излучения полупроводниковых лазеров рассмотрено в работах В.С. Машкевича [1; 2]. Возможность генерации лазерного излучения на основе излучательной рекомбинации экситонов в гетеролазерах была доказана П.Г. Елисеевым [3]. Впервые лазерная генерация, основанная на экситонном механизме излучательной рекомбинации, осуществлена В.П. Грибковским на полупроводниковых соединениях $A^{II}B^{VI}$ и детально исследована им [4]. При этом теоретически и практически были выделены следующие основные тенденции: экситонные переходы могут служить каналом для накачки при возбуждении полупроводникового лазера другим лазером; поглощение света экситонами и экситонное поглощение вносят ощутимый вклад в потери перепоглощения; связывание свободных носителей в экситонные пары препятствует созданию инверсной населенности, что особенно ощутимо в допороговой области. Однако наибольший интерес для исследования представляет получение лазерной генерации на излучательных экситонных переходах. Во-первых, экситонный механизм излучательной рекомбинации примечателен тем, что энергия излучаемого кванта меньше, чем энергия запрещенной зоны, и находится за пределом собственного поглощения кристалла, т.е. в области прозрачности. Этот эффект объясняется тем, что в энергообмене участвует энергия связи экситона, а также может участвовать энергия одного или нескольких фононов. Во-вторых, все более широкое использование инжекционных полупроводниковых лазеров (ИПЛ) на квантоворазмерных структурах (КРС) на основе сложных тройных и четверных соединений полупроводниковых материалов приводит к необходимости пересмотра зонной теории полупроводников с точки зрения принципов квантовой механики. В частности, в КРС появилась возможность локализовать большое количество носителей в малом объеме, снизить до минимума объемное растекание. В квантоворазмерных слоях собственная энергия носителей квантуется, тем самым нейтрализуется эффект объемного вырождения энергетических зон в кристалле. В этих условиях взаимодействие частиц и полей значительно отличается от принятого для обычного (объемного) полупроводника с параболически-

ми зонами. Кроме того, в КРС энергия связи экситонов значительно возрастает и мало зависит от температуры; экситоны могут существовать не распадаясь вплоть до 200 °С; меняются механизмы их образования и аннигиляции. Изучение механизмов влияния экситонов на процессы лазерной генерации в ИПЛ на КРС привлекает все большее внимание исследователей [5].

Чтобы изучить влияние излучательной экситонной рекомбинации на выходные статические характеристики ИПЛ на КРС на основе GaAs/Al_xGa_{1-x}As, при $x < 0,45$ (материал активного слоя — прямозонный) нами была решена система скоростных уравнений. Система решалась для определения концентраций электронов, экситонов, а также плотностей фотонов, генерируемых в результате зон-зонной и экситонной излучательной рекомбинации. Эта система имеет следующий вид:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{J}{ed} - \frac{N}{\tau_s} - \alpha NP_1 - \frac{N}{\tau_{ex}}; \quad (1)$$

$$\frac{dN_{ex}}{dt} = \frac{N}{\tau_{ex}} - \frac{N_{ex}}{\tau_s^*} - \alpha N_{ex} P_2; \quad (2)$$

$$\frac{dP_1}{dt} = \alpha NP_1 + \beta \frac{N}{\tau_s} - \frac{P_1}{\tau_p}; \quad (3)$$

$$\frac{dP_2}{dt} = \alpha N_{ex} P_2 + \beta \frac{N_{ex}}{\tau_{ex}^*} - \frac{P_2}{\tau_p}. \quad (4)$$

Здесь N — концентрация неосновных носителей заряда (электронов), инжектированных в активную область; J — плотность тока накачки; e — заряд электрона; τ_s — спонтанное время жизни неосновных носителей; α — коэффициент оптического усиления; P_1 — плотность фотонов, возникающих в результате излучательной рекомбинации электронов в активной области; τ_{ex} — спонтанное время жизни экситонного уровня; N_{ex} — концентрация экситонов, возникающих в активной области в результате связывания свободных носителей заряда; τ_s^* — время спонтанной излучательной рекомбинации неосновных носителей; P_2 — плотность фотонов, возникающих в резонаторе в результате излучательной рекомбинации экситонов; β — доля спонтанного излучения, попадающего в ла-

зерную моду; τ_p — время жизни фотона в резонаторе; τ_{ex}^* — время спонтанной излучательной рекомбинации экситона.

Система уравнений (1)—(4) была пронормирована и решена для стационарного режима работы. Статические характеристики ИПЛ на КРС с учетом генерации лазерного излучения на экситонных переходах представлены на рис. 1—4 в относительных единицах (о.е.).

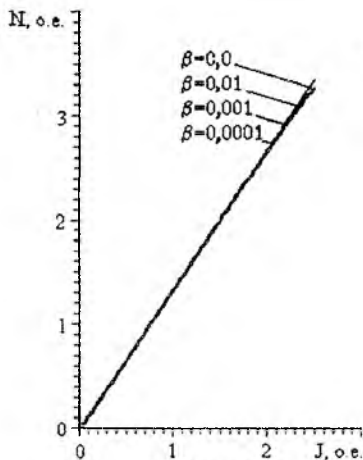


Рис. 1

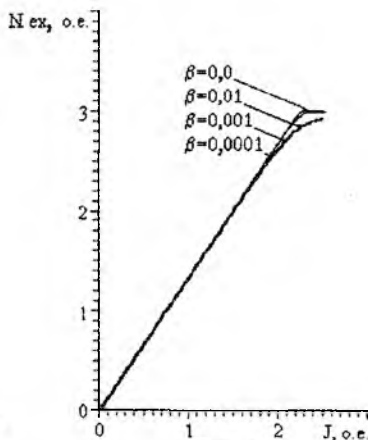


Рис. 2

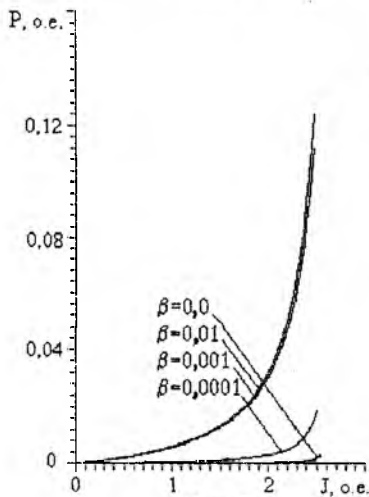


Рис. 3

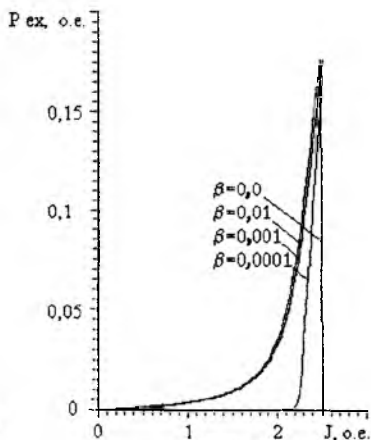


Рис. 4

Уравнения (1)—(4) записаны с учетом следующих допущений:

– фотоны, генерируемые при электронно-дырочной и экситонной излучательных рекомбинациях, попадают в одну и ту же лазерную моду (одномодовое приближение);

– основным источником возникновения экситонов является связывание свободных носителей в активной области за счет кулоновского взаимодействия;

– экситоны рекомбинируют излучательно без взаимодействия с фононами решетки;

– взаимодействием экситонов со свободными носителями и полем объемного заряда можно пренебречь.

Подобные допущения справедливы в рамках уже существующих моделей, основанных на применении скоростных уравнений при изучении статических и динамических характеристик излучения ИПЛ на КРС.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать следующие основные выводы:

– порог экситонной лазерной генерации достигается раньше, чем порог электронно-дырочной лазерной генерации, и превосходит последний по нормированной плотности тока накачки приблизительно на 0,15; ;

– в вышестороговой области, области генерации, нормированная плотность фотонов при одних и тех же значениях плотности тока накачки у экситонной генерации выше, чем у электронно-дырочной, приблизительно на 0,04.

Данные выводы хорошо согласуются с квантовомеханическим расчетом времен жизни электронных и экситонных уровней в зоне проводимости КРС, а также частот излучательных переходов [4; 5].

Список литературы: 1. *Машкевич В.С.* Кинетическая теория лазеров. М.: Наука, 1971. 472 с. 2. *Машкевич В.С.* Основы кинетики излучения лазеров. К.: Наук. думка, 1966. 235 с. 3. *Елисеев П.Г.* Введение в физику инжекционных лазеров. М.: Наука, 1983. 296 с. 4. *Грибкоеский В.П.* Полупроводниковые лазеры. Минск: Университетское, 1988. 304 с. 5. *Tung Sun Koh, Yan Ping Feng, Spector H.N.* Effects of electric field on the exciton linewidth broadening due to scattering by free carriers in semiconducting quantum well structures // *IBEE j. quantum electronics*. 1997. Vol. 33, N 10. P. 1567—1572.

Харьковский государственный технический университет радиозлектроники

Поступила в редколлегию 23.03.98