

## **ВІДГАЛУЖУВАННЯ ТА МОДУЛЯЦІЯ ЗВ'ЯЗАНИХ МОД У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ШАРАХ З КВАНТОВИМИ ЯМАМИ**

*Левандовський В. Г., к.ф.-м.н., доц.; Мукойда Є. О.  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна*

Перемикання і модуляція є дуже важливими і необхідними функціями ряду пристроїв інтегральної оптики [1]. Існує велика категорія таких пристроїв, принцип дії яких ґрунтується на взаємодії мод в двох паралельних хвилеводах. У цьому повідомленні ми проаналізуємо випадок, коли власні моди хвилеводів виявляються зв'язаними між собою внаслідок збурення діелектричної проникності в напівпровідникових шарах таких хвилеводів з квантовими ямами (КЯ)

Для опису взаємодії мод використаємо теорію зв'язаних мод [2]. Ця теорія оперує з наступними основними параметрами: 1) довжина взаємодії  $L$ , 2)  $\chi$  — коефіцієнт зв'язку, або відповідна довжина зв'язку  $l = \pi/2\chi$ , яка характеризує мінімальну відстань необхідну для передачі енергії з однієї моди хвилеводу) в іншу, 3) фазове неузгодження  $\Delta\beta = \beta_1 - \beta_2$  між сталими поширення мод в двох каналах. Повна передача потужності досягається, коли  $\Delta\beta = 0$ , тобто якщо  $L = (2n + 1)l$  ( $n = 1, 2, \dots$ ). Таким чином, якщо в подібних структурах з допомогою електричного поля змінювати параметр  $\Delta\beta$ , то можна модулювати довжину зв'язку  $l$  і енергію, яка переноситься від однієї моди до іншої.

Розглянемо конфігурацію структури, що складається з двох паралельних оптичних хвилеводних каналів з показником заломлення  $n_2$ , товщиною  $t$  (вдovж координати  $x$ , перпендикулярної до напрямку поширення хвилі —  $z$ ), розділених проміжком з відповідними параметрами  $n_1$ ,  $s$  та зовнішніми шарами з показником заломлення  $n_3$  з періодично збуреними областями, приграничними до хвилеводних каналів. Зовнішня сторона кожного хвилеводу сформована у вигляді періодично розташованих вздовж осі  $z$  квантових ям шириною  $a_w$  з періодом  $b$ , що ціле число разів розміщується на довжині зв'язку  $l$ . В такій структурі зовнішнє електричне поле моделюватиме діелектричну проникність на величину  $\Delta\epsilon(x)$ , наприклад, в околі вікна прозорості  $\lambda = 1,55$  мкм, головним чином за рахунок зміни концентрації електронів в КЯ —  $N_w$ , так що згідно моделі Друде [3]:  $\Delta\epsilon = \epsilon_2 [(\Delta N_w e^2) / (\epsilon_0 m^* \omega^2)]$ , де  $\epsilon_0$  — діелектрична стала,  $\epsilon_2 = \sqrt{n_2}$ ,  $m^*$  — ефективна маса електрону у КЯ,  $e$  — заряд електрону,  $\Delta N_w$  — зміна концентрації електронів у КЯ.

Для визначення параметрів режимів перемикання і модуляції в такій структурі ми використовували формалізм теорії зв'язаних мод [2].

Інтенсивність електромагнітної хвилі  $P_0$  перерозподіляється в такій структурі між двома хвилеводами наступним чином:

$$P_1(z) = P_0 - P_2(z); \quad P_2(z) = P_0 \frac{\chi^2}{\chi^2 + \delta^2} \sin^2[(\chi^2 + \delta^2)^{1/2} z].$$

Тут  $P_0$  — інтенсивність хвилі, яка пропорційна квадрату амплітуди, на вході в один із хвилеводів. Повне передавання інтенсивності відбувається на відстані  $l = \pi/2\chi$  за умови  $\delta = 0$ , де константа неузгодженості  $\delta = 0.5(\Delta\beta - 2\chi)$  визначається фазовим неузгодженням  $\Delta\beta$  і коефіцієнтом зв'язку  $\chi$ .

Для розглядуваної структури максимальна частина інтенсивності, яка може бути перенесена з одного хвилеводного шару в інший за умови  $\delta \neq 0$  визначається співвідношенням  $\chi^2/(\chi^2 + \delta^2)$ , який для  $TE$  — мод та ідентичних хвилеводів ( $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ ) в першому наближенні по збуренню діелектричної проникності обчислюється для однакових планарних хвилеводів з наступних виразів:

$$\chi = 2h^2 p e^{-ps} / \beta(t + 2/p^2)(h^2 + p^2), \\ h^2 = n_2^2 k^2 - \beta^2, q^2 = \beta^2 - n_1^2 k^2, p^2 = \beta^2 - n_3^2 k^2, k = \omega/c.$$

Для визначення сталої поширення  $\beta$  слугує характеристичне рівняння, яке для планарних хвилеводів матиме вигляд:

$$\tan(ht) = (q + p) / [h(t - pq/h^2)].$$

Для модуляції і перемикання світлових потоків в таких структурах варіюється профіль показника заломлення і довжина зв'язку  $l$ . Прикладена напруга ініціює зміну діелектричної проникності за рахунок зміни концентрації електронів у КЯ, а отже, змінює режим перемикання енергії. Щоб оцінити ефективність даної структури необхідно знати зміну величини концентрації електронів  $N_w$  у КЯ за умов прикладання електричного поля. Для цього використовувався варіаційний метод розв'язку рівняння Шредінгера для прямокутного модельного потенціалу з урахуванням деформації дна КЯ в електричному полі разом із рівнянням Пуасона зі стандартними граничними умовами для визначення розподілу поля і потенціалу в структурі. Численний розв'язок системи рівнянь дозволив змодельовати поведінку структури у зовнішньому полі.

Для структури  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As/GaAs$  з  $a_w = 5$  нм і глибиною КЯ 1eВ при зміні прикладеної напруги на 0.25 В відбувається перезавповнення рівнів розмірного квантування. В результаті середня концентрація електронів в області КЯ змінюється на величину  $\Delta N_w \approx 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , а показник заломлення на величину  $\Delta n \approx 5 \cdot 10^{-3}$ . В такій структурі для довжини хвилі  $\lambda = 1.55$  мкм,  $t = 3$  мкм,  $s = 3$  мкм можна отримати коефіцієнт зв'язку  $\chi \approx 5 \text{ см}^{-1}$ , а довжину взаємодії  $l \approx 3$  мм.

На закінчення необхідно сказати, що перевагою застосування напівпровідникових структур з КЯ в порівнянні з подібними пристроями, що ви-

користовують електрооптичний ефект, є їх швидкодія. Як впливає з розрахунків і літературних даних швидкодія структур, що працюють на основі електрооптичного ефекту порядку  $10^9$  —  $10^{10}$  1/с. Для розглянутої структури ця величина зростає до  $10^{12}$  1/с, так як вона визначається часом максвеллівської релаксації електронів, які мають в квантоворозмірних структурах високу рухливість (на 1-2 порядку вище, ніж в об'ємі) і малу ефективну масу. Це дозволяє використовувати такі пристрої не тільки в лінійних, але і нелінійних (солітонних) волоконно-оптичних системах зв'язку.

#### **Перелік посилань**

1. Гайворонская Г. С. Особенности применения оптических коммутаторов в современных информационных сетях / *Электронный ресурс* / .С. Гайворонская, А.В. Рябцов // *Applicable Information Models*. ITHEA Sofia Bulgaria. — 2011 — с. 169-180. Режим доступа до збірника.: — <http://www://ithea.org>. — ISBN: 978-954-16-0052-8.
2. Yariv A. Coupled-mode theory for guided-wave optics. / A. Yariv // *IEEE J. Quant. El.* — vol. QE-9, No9. — P. 919–933. — *Бібліогр.:* с. 933.
3. Bohren C.F. Absorption and Scattering of Light by Small Particles / Bohren C.F., Huffman D.R. — John Wiley & Sons. New York-Chichester, Brisbane Toronto, Singapore. — 1983. — 640 p. — *Бібліогр.:* с. 624-656 (531 назви) та в підрядк. прим. — ISBN: 9780471293408

#### **Анотація**

Проведено дослідження поширення світлового випромінювання в одномодових хвилеводах із квантовими ямами. В цьому випадку оптичне тунелювання між хвилеводами контролюється електричним полем. Мала ефективна маса і збільшена рухливість носіїв заряду призводить до підвищення ефективності модуляції відгалужування або перемикання світлових потоків.

Ключові слова: оптичне тунелювання, зв'язані хвилеводи, квантова яма, модуляція, відгалужування, перемикання, лінії зв'язку.

#### **Аннотация**

Проведено исследование распространения светового излучения в одномодовых волноводах с квантовыми ямами. В этом случае оптическое туннелирование между волноводами контролируется электрическим полем. Малая эффективная масса и увеличенная подвижность носителей заряда приводит к увеличению эффективности модуляции, ответвления или переключения.

Ключевые слова: оптическое туннелирование, связанные волноводы, квантовая яма, модуляция, ответвление, переключение, линии связи.

#### **Abstract**

The analysis of light beams propagation in single-mode waveguides with quantum wells being made. In this case mode of optical tunneling is controlled by electric field. Small effective mass and essential carrier's mobility in films leads to enhanced modulation speed and light energy branching or pumping.

Keywords: optical tunneling, coupled waveguides, quantum well, modulation, branching, switching, communication lines.