

Разработка квантового каскадного лазера, работающего на моде поверхностного плазмон-поляритона с отрицательной дисперсией.

А. А. Богданов

тел: (921) 310-24-12, эл. почта: bogdanftf@mail.ru

Одной из наиболее важных характеристик лазера является, коэффициент усиления α , который пропорционален фактору оптического ограничения моды Γ и обратно пропорционален групповой скорости волны $V_{гр}$ [1]. Чтобы уменьшить потери на свободных носителях в обкладках волновода, в качестве рабочей моды стараются использовать ту, для которой Γ максимален. В квантовых каскадных лазерах (ККЛ) в ближнем инфракрасном (ИК) диапазоне Γ максимален для волноводных мод, в дальнем ИК и терагерцевом диапазоне Γ максимален для поверхностных плазмон-поляритонов (ППП) [2]. Чтобы увеличить Γ , обкладки волновода выращивают из сильно легированного материала или металла.

Увеличить α можно и другим способом, уменьшив групповую скорость волны. Подобный принцип используется при создании полупроводниковых лазеров с технологией распределенной обратной связи [3]. Для этого необходимо наличие моды, для которой групповая скорость волны может быть равна нулю. В этой работе мы показали, что в волноводе для ППП возможна отрицательная дисперсия и нулевая групповая скорость. Рассмотрим подробнее поверхностный плазмон-поляритон.

Известно, что вдоль поверхности раздела металл-диэлектрик или металл-полупроводник может распространяться ППП [4]. Для поверхностной волны потоки энергии в металле и диэлектрике (полупроводнике) направлены в противоположные стороны. Так как поверхностная волна проникает в диэлектрик (полупроводник) сильнее, чем в металл, то и направление потока энергии ППП совпадает с направлением потока энергии в диэлектрике (полупроводнике). Таким образом, дисперсия для ППП всегда положительна ($v_{gp} = d\omega/k_z > 0$).

Теперь рассмотрим поверхностную волну в плоском тонком симметричном волноводе. Волна представляет собой два когерентных поверхностных плазмон-поляритона. В силу симметрии рассматриваемой задачи возможно, образование симметричной и антисимметричной моды. При образовании симметричной моды компоненты электрических полей складываются, а при образовании антисимметричной моды — вычитаются. Таким образом, за счет перекрытия полей поверхностных поляритонов и их интерференции суммарное поле внутри волновода ослабляется. При сильном перекрытии может оказаться, что значение полного потока энергии в обкладках по модулю больше, чем в волноводном слое. Следовательно, групповая скорость волны будет отрицательна. Заметим, что для симметричной моды такого наблюдаться не будет, так как для нее компоненты электрического поля складываются. При этом величина пото-

ка энергии в волноводном слое увеличивается. Поэтому дисперсия для нее всегда положительна.

Условие, при котором отрицательная дисперсия наблюдается, можно записать так

$$(\Omega_1^2 - \Omega_2^2) \left((\varepsilon_2 d) / (\pi c) \right)^2 < 0.71 \quad (1)$$

В этой формуле $\Omega_{1,2}$ - это плазменные частоты обкладок волновода и волноводного слоя, d — толщина волноводного слоя, ε_2 высокочастотная диэлектрическая проницаемость волноводного слоя. Наличие интервала частот, для которого дисперсия отрицательна ($V_{gp} = d\omega/dk_z < 0$), приводит к существованию частоты ω^* , для которой $V_{gp} = 0$. Вблизи частоты ω^* коэффициент усиления лазера $\alpha \gg 1$.

Таким образом, используя моду ППП с отрицательной дисперсией, можно добиться высокого коэффициента усиления ККЛ без использования технологии распределенной обратной связи.

Работа выполнена в рамках аналитической ведомственной программы «Развитие научного потенциала высшей школы», проект 988.

Литература

1. Звелто О. Принципы лазеров.—М. : Мир, 1990.
2. C. Gmachl, F. Capasso, D. L. Sivco, and A. Y. Cho. , Rep. Prog. Phys. , 64,1533 (2001).
3. R. A. Suris, R. F. Kazarinov. , Sov. Phys. - Semicond. Vol. 6., No. 7 (1973)
4. Поверхностные поляритоны. Под ред. В. М. Аграновича, Д. Л. Миллса. М. : Наука, 1985.