Лазерная генерация на плазмонных модах в квантовых ямах на основе теллурида ртути

Капралов К.Н., Алымов Г.В., Свинцов Д.А.

Лаборатория оптоэлектроники двумерных материалов, Московский физико-технический институт, Долгопрудный

DOI 10.34077/Semicond2019-226

Частота излучения полупроводниковых лазеров ограничена шириной запрещенной зоны, в связи с чем получение излучения дальнего инфракрасного диапазона затруднительно в полупроводниковых соединениях $A_{III}B_V$. Данная проблема может быть потенциально разрешена с помощью бесщелевых полупроводников и квантовых ям (КЯ) на их основе, например, теллурида кадмия-ртути ($CdHgTe$). Перспективность данных КЯ обусловлена квази-релятивистским законом дисперсии электронов и дырок, который способствует подавлению безызлучательной оже-рекомбинации [1]. Недавние эксперименты подтвердили возможность лазерной генерации в КЯ $CdHgTe$ на фотонных модах с длиной волны до 20 мкм при оптической накачке [2]. По сравнению с генерацией на фотонных модах, генерация на плазмонных модах (surface plasmon lasing) позволит создавать сверхкомпактные лазеры с субволновым размером. Однако достижение плазмонной генерации затруднено из-за внутризонного поглощения плазмонов (затухания Ландау).

В работе теоретически исследуется возможность усиления поверхностных плазмонов в КЯ $CdHgTe$ с межзонной инверсной населенностью. Показано, что отношение величины затухания Ландау к межзонному усилению для плазмонов мало по параметру $\exp[-m^*(\omega/k)^2/2T]$, где ω и k – частота и волновой вектор плазмона, T – электронная температура, m^* – эффективная масса носителей.

Рис. 1. Температурная зависимость пороговой концентрации неравновесных электронов и дырок, необходимой для лазерной генерации на плазмонных модах в КЯ $Cd_{0.7}Hg_{0.3}Te/HgTe/Cd_{0.7}Hg_{0.3}Te$ различной толщины.

межзонной проводимости (горизонтальные участки на рис. 1). При повышении температуры пороговая концентрация определяется условием обнуления действительной части проводимости на частоте плазмона (наклонные участки на рис. 1). В реалистичных квантовых ямах $Cd_{0.7}Hg_{0.3}Te/HgTe/Cd_{0.7}Hg_{0.3}Te$, выращенных в направлении [013], пороговая концентрация имеет порядок 10^{11} см^{-2} , что является достижимой величиной при межзонной накачке.

Необходимым условием усиления поверхностных плазмонов является отрицательность действительной части проводимости квантовой ямы, $\text{Re } \sigma(\omega, k) < 0$. Расчет проводимости был выполнен по правилу Ферми с учетом реалистичной зонной структуры КЯ. Последняя была вычислена путем квантования шестизонной модели Кейна [3]. Граничные частота и волновой вектор, при которых возможны межзонные переходы, ограничены законами сохранения энергии и импульса. При этом конечный волновой вектор плазмона сужает диапазон частот, в котором достижимо усиление.

Удастся вычислить пороговую концентрацию n неравновесных электронов и дырок, при которой начинается межзонное усиление поверхностных плазмонов. При низких температурах данная концентрация определяется касанием закона дисперсии плазмонов и области отрицательной

[1] Alymov G. et al. Auger recombination in Dirac materials: A tangle of many-body effects //Physical Review B. – 2018. – Т. 97. – №. 20. – С. 205411.

[2] Morozov S. V. et al. Stimulated emission from HgCdTe quantum well heterostructures at wavelengths up to 19.5 μm //Applied Physics Letters. – 2017. – Т. 111. – №. 19. – С. 192101.

[3] Zholudev M. et al. Magnetospectroscopy of two-dimensional HgTe-based topological insulators around the critical thickness //Physical Review B. – 2012. – Т. 86. – №. 20. – С. 205420.