

СДВИГ ЛИНИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ИНЖЕКЦИОННЫХ ЛАЗЕРОВ НА ОСНОВЕ
InSb ПРИ УВЕЛИЧЕНИИ КОНЦЕНТРАЦИИ АКЦЕПТОРНЫХ ПРИМЕСЕЙ

С. П. Грищечкина, А. П. Шотов

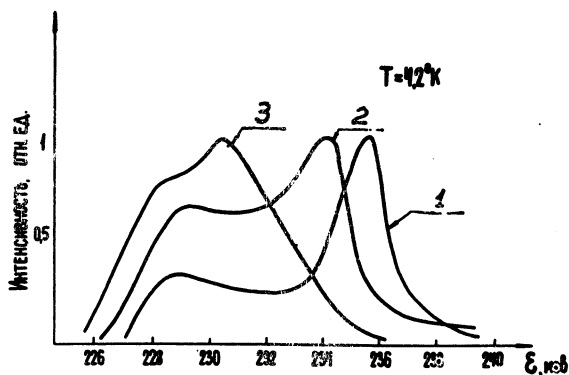
УДК 537.311.33

Получена генерация когерентного излучения при $T=20^{\circ}\text{K}$ при электрической инжекции носителей с помощью p^+-p-n^+ структуры. По спектру спонтанного и когерентного излучения наблюдалось уменьшение ширины запрещенной зоны с увеличением концентрации акцепторных примесей. Показана возможность изменения в небольших пределах ($\sim 5\%$) частоты лазерного излучения.

Известно, что с ростом концентрации мелких водородоподобных примесей в полупроводниках наблюдается уменьшение энергии ионизации примесных уровней до их слияния с основной зоной. Исследования рекомбинационного излучения, проведенные в германии /1/ n -типа показали, что с ростом концентрации примесей наблюдается уменьшение энергии излучательных переходов зона проводимости - валентная зона при практически неизменной энергии излучательных переходов электрона с донорного уровня в валентную зону. Объяснение этого факта дано в работе /3/, где рассмотрено экранированное кулоновское взаимодействие электронов с заряженными донорами и показано, что с ростом концентрации доноров должно иметь место только изменение относительно вакуума энергии основной зоны, и практически неизменной должна оставаться энергия основного состояния донорного уровня.

В настоящей работе проведено исследование спонтанного и когерентного излучения в кристаллах InSb p -типа при электрической инжекции носителей с помощью p^+-p-n^+ структуры. На чистых и легированных кристаллах InSb была получена генерация ко-

герентного излучения при $T = 20^\circ\text{K}$ (ранее генерация наблюдалась при $T = 4,2^\circ\text{K}$ /4/). По смещению линий спонтанного и когерентного излучения установлено уменьшение ширины запрещенной зоны E_g с увеличением концентрации примесей.

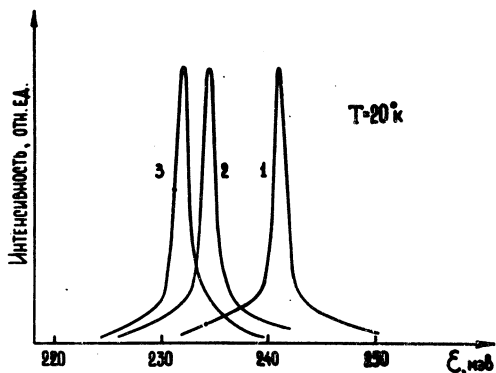


Р и с. 1. Спектры спонтанного излучения образцов при $T = 4,2^\circ\text{K}$ при различной концентрации акцепторов: 1 - $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; 2 - $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$; 3 - $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$.

Владение того, что энергия ионизации мелких акцепторных уровней довольно велика (~ 10 мэв), слияние примесной зоны с основной происходит при концентрациях примесных центров 10^{17} см^{-3} . Поэтому с увеличением концентрации примесей от 10^{13} см^{-3} до 10^{17} см^{-3} можно наблюдать уменьшение ширины запрещенной зоны на ~ 10 мэв. Из-за большой эффективной массы плотности состояний при $p \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ даже при $T = 4,2^\circ\text{K}$ вырождение носителей в валентной зоне еще не наступает. Концентрация же электронов в материале p-типа определяется уровнем инжекции, поэтому при малых уровнях инжекции можно наблюдать излучательные переходы при энергиях квантов, близких к ширине запрещенной зоны.

На рис. 1 представлены спектры спонтанного излучения образцов с концентрацией акцепторов $N_A = 2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ и $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при $T = 4,2^\circ\text{K}$ и малой концентрации инжектированных носителей. Видно, что с ростом концентрации акцепторов происходит смещение энергии максимума в спектре излучения зона - зона в длинноволновую сторону. Энергия максимума в спектре излучательно-

го перехода электрона из зоны проводимости на акцепторный уровень не изменяется с ростом концентрации акцепторов, хотя ширина спектра увеличивается. Измерения, проведенные в магнитном поле, позволяют более точно оценить изменение ширины запрещенной зоны путем экстраполяции энергии максимума в спектре излучательных переходов зона - зона к нулевому магнитному полю. Из этих измерений



Р и с. 2. Спектры когерентного излучения образцов с различным содержанием акцепторов при $T = 20^{\circ}\text{K}$: 1 - $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$; 2 - $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$; 3 - $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$

следует, что при концентрации акцепторов $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ не происходит изменения ширины запрещенной зоны, при $2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ E_g уменьшается на 2 мэв, а при $8 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ - на 4,7 мэв.

На всех этих кристаллах наблюдалась генерация когерентного излучения при $T = 4,2^{\circ}\text{K}$ и $T = 20^{\circ}\text{K}$. Для количественной оценки уменьшения ширины запрещенной зоны из смещения линии когерентного излучения необходимо учитывать положение квазиуровней Ферми электронов F_e и дырок F_h , определяющих инверсную заселенность носителей при генерации.

Измерения показали, что пороговый ток для генерации когерентного излучения (а следовательно, и положение квазиуровней Ферми) при 20°K практически не зависит от концентрации примесей вплоть до $\sim 10^{16} \text{ см}^{-3}$. Поэтому смещение энергетического положения линии излучения, наблюдающееся при $T = 20^{\circ}\text{K}$, можно объяснить изменением ширины запрещенной зоны. На рис. 2 приведены спектры когерент-

ного излучения для трех кристаллов InSb при $T = 20^\circ\text{K}$. Видно, что с ростом концентрации акцепторных примесей от $2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ линия когерентного излучения сдвигается в длинноволновую сторону приблизительно на ~ 10 мэв. Этот факт может быть использован для изменения частоты лазеров в пределах $\sim 5\%$.

Следует заметить, что пороговый ток для генерации когерентного излучения при $T = 4,2^\circ\text{K}$ существенно возрастает при увеличении концентрации акцепторных примесей $N_A > 10^{15} \text{ см}^{-3}$. Поэтому энергетическое положение линии излучения в этом случае определяется двумя эффектами: уменьшением ширины запрещенной зоны и ростом квази-уровня Ферми. Таким образом, при $T = 4,2^\circ\text{K}$ смещение частоты когерентного излучения с ростом концентрации примесей меньше ($\sim 2\%$).

Поступила в редакцию
28 мая 1973 г.

Л и т е р а т у р а

1. А. П. Шотов, М. С. Муратов. ФТП, **1**, 573, (1967).
2. Н. А. Пенин, Б. Г. Журкин, Б. А. Волков. ФТТ, **7**, 9188 (1965).
3. Б. А. Волков, В. В. Матвеев. ФТТ, **8**, 721 (1966).
4. А. П. Шотов, С. П. Гринечкина, Е. Д. Кошловский, Р. А. Муминов. ФТТ, **8**, 1083 (1966); А. П. Шотов, С. П. Гринечкина, Р. А. Муминов. ФТТ, **8**, 2496 (1966).