

Твердотельный мазер субмиллиметрового диапазона с плавной перестройкой частоты и накачкой током поляризованных по спину электронов

Виглин Н.А., Осипов В.В., Устинов В.В., Наумов С.В., Цвелиховская В.М.



Исследованы явления, сопровождающие транспорт поляризованных по спину электронов в контактных структурах на основе полупроводника $InSb$ и ферромагнитных полупроводников. Зарегистрировано электромагнитное излучение в диапазоне миллиметровых и субмиллиметровых волн с характеристиками, соответствующими стимулированному излучению при переходах между Зеемановскими уровнями электронов проводимости в $InSb$.

В полупроводнике $n-InSb$, благодаря особенностям его электронной подсистемы, возможно наблюдение магнитодипольного спинового резонанса на электронах проводимости, а при соблюдении некоторых дополнительных условий – электродипольного спинового резонанса (ЭДСР), интенсивность которого на два порядка больше, чем магнитодипольного резонанса [1]. За счет большого по абсолютной величине значения g -фактора ($g \approx -50$) резонансные условия для миллиметровых и даже субмиллиметровых волн достигаются в магнитных полях $B < 1$ Т.

Концепция создания активной квантовой среды в полупроводнике $n-InSb$ (П) заключается в инвертировании заселенностей уровней электронов, участвующих в резонансе, путем инжекции в П электронов из материала, играющего роль поляризатора электронов. В качестве такого материала могут быть использованы ферромагнитные полупроводники (ФМП), в которых ниже температуры Кюри электроны проводимости имеют высокую степень поляризации по спину. Спин и магнитный момент электронов проводимости в $n-InSb$ параллельны ($g < 0$). Если в ФМП спины электронов поляризованы против поля, то в $n-InSb$ электроны проводимости займут верхние Зеемановские уровни, создав активную среду [2].

Внешнее магнитное поле задает расщепление уровней электронов, а значит, и частоту квантов. Заметим, что электромагнитная эмиссия в случае релаксации электронов путем излучательных переходов может быть только вы-

нужденной. Это следует из того, что вероятность спонтанных излучательных переходов на Зеемановских уровнях в магнитных полях $B < 1$ Т чрезвычайно мала.

Нами исследовались контактные структуры (КС) на основе полупроводника $n-InSb$ и различных ферромагнитных материалов: ферромагнитных полупроводников $n-Eu_{0,98}Gd_{0,02}O$ ($T_C = 130$ К), n - и $p-HgCr_2Se_4$ ($T_C = 120-130$ К), манганита $La_{0,8}Ba_{0,2}MnO_3$ ($T_C = 250$ К), сплавов Гейслера Co_2MnSn ($T_C = 826$ К) и Co_2MnSb ($T_C = 478$ К).

КС формировалась либо механическим прижиманием двух полированных пластин ФМП и $InSb$, вырезанных из монокристаллов, либо термическим нанесением в вакууме пленки ферромагнитного материала на пластину из $InSb$.

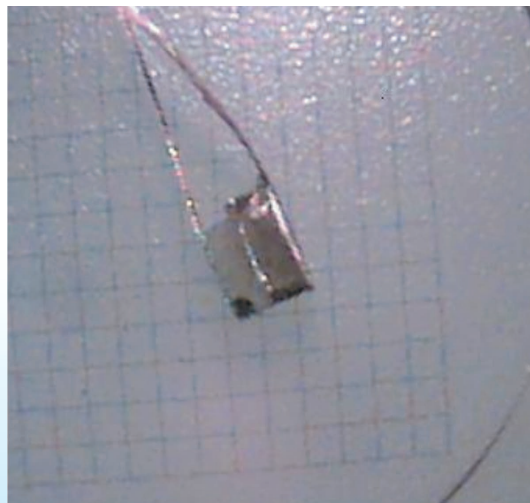


Рис.1
КС $p-HgCr_2Se_4 - n-InSb$.

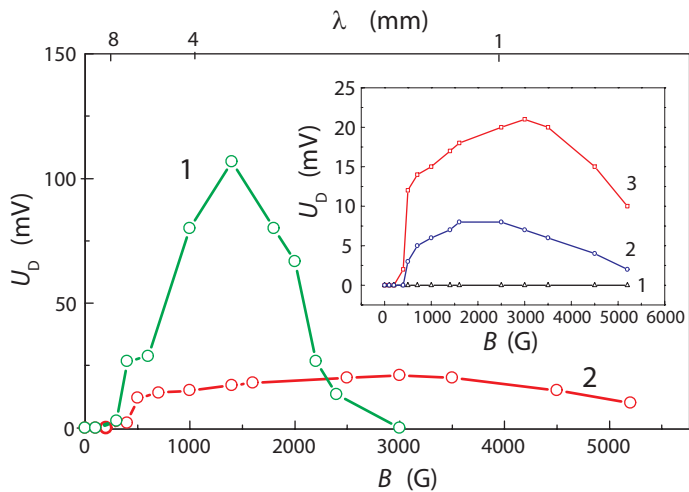


Рис.2

Амплитуда СВЧ излучения в зависимости от магнитного поля: 1- для КС с $n\text{-Eu}_{0,98}\text{Gd}_{0,02}\text{O}$, ток 2А; 2 - $p\text{-HgCr}_2\text{Se}_4$, ток 1А; на вставке - для КС с $p\text{-HgCr}_2\text{Se}_4$ при токе 1- 0,5 А; 2 – 0,7 А; 3 – 1А.

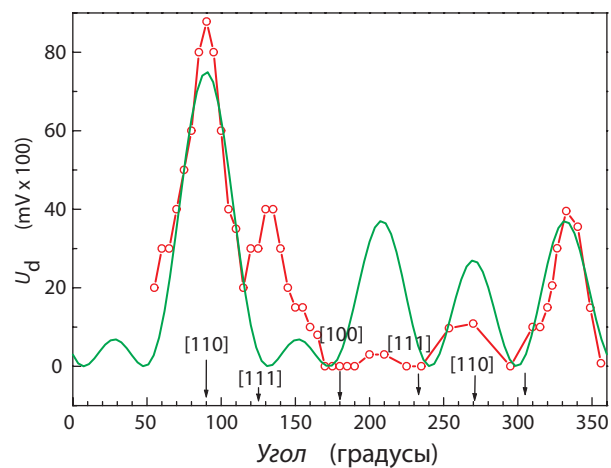


Рис.3

Зависимость выходной мощности от угла между направлением магнитного поля и осями кристалла ПП, когда поле лежит в плоскости [110] – красная линия; зеленая линия - зависимость мощности поглощения при ЭДСР.

Для КС с ФМП $p\text{-HgCr}_2\text{Se}_4$, $n\text{-Eu}_{0,98}\text{Gd}_{0,02}\text{O}$, $\text{La}_{0,8}\text{Ba}_{0,2}\text{MnO}_3$, Co_2MnSn и Co_2MnSb было обнаружено излучение в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах, которое возникало при инжекции электронов из ФМП в полупроводник и достижении некоторых пороговых значений магнитного поля и тока. Нарастание мощности излучения при увеличении тока и поля от их пороговых значений было экспоненциальным.

С помощью проходных резонаторов был проведен спектральный анализ. Было обнаружено, что соотношение частоты излучения и магнитного поля описывается выражением $h\nu = g\mu_B B$ с $|g|=50$, т.е. частота излучения ν соответствует переходам на Зеемановских уровнях электронов проводимости в $n\text{-InSb}$.

Этот вывод подтверждается исследованиями зависимости амплитуды излучения от угла между направлениями кристаллических осей в П и магнитного поля. Дело в том, что ЭДСР в $n\text{-InSb}$ разрешен только в случае нарушения инверсной симметрии, которое достигается при совпадении направления внешнего магнитного поля с направлением оси [110] кристалла полупроводника. Нами было установлено, что электромагнитная эмиссия возникает при тех же условиях, при которых реализуется ЭДСР на Зеемановских уровнях электронов проводимости (рис.3) [3].

Лазерный характер излучения подтверждается исследованиями пороговых значений магнитного поля и тока, при которых возникает электромагнитная эмиссия в различных КС, и выходной мощности, полученной в них. Анализ позволил заключить, что перечисленные параметры могут быть связаны с помощью лазерного уравнения для плотности фотонного потока $F = F_0 \cdot \exp[(N_2 - N_1)\sigma L]$, где F - плотность выходного потока фотонов, F_0 - начальная плотность потока фотонов, N_1 и N_2 - заселенность верхнего и нижнего Зеемановских уровней, σ - сечение взаимодействия вынужденных переходов между уровнями и фотонами, L - длина образца.

Уравнение может быть переписано с учетом затухания фотонов на свободных носителях, пропорционального $\lambda^2 \sim 1/\nu^2 \sim 1/B^2$, как $U_D \sim F = F_0 \cdot \exp[(c_1 k_{\text{пол}} \sigma l - c_2/B^2)L]$, где c_1, c_2 - некоторые константы, $k_{\text{пол}} = (N_2 - N_1)/(N_2 + N_1)$, U_D - сигнал детектора. Дальнейшие преобразования могут показать, что зависимость выходной мощности от тока и магнитного поля экспоненциальная.

Таким образом, можно утверждать, что мы имеем дело со стимулированным электромагнитным излучением, индуцированным инжекцией поляризованных по спину электронов проводимости.

¹ M. Dobrowolska, *Semicond. Sci. Technol.* 5, 159 (1990).

² V.V. Osipov and N.A. Viglin *J. of Communications Technology and Electronics*, 48, 548 (2003).

³ Н.А. Виглин, В.В. Устинов, В.М. Цвелиховская, О.Ф. Денисов. *Письма в ЖЭТФ*, 84, 84 (2006).

⁴ О. Звелто. *Принципы лазеров*. М., Мир, 1990