

ГЕНЕРАЦИЯ И СПЕКТРАЛЬНЫЙ СОСТАВ СТИМУЛИРОВАННОГО ДЛИННОВОЛНОВОГО ИК ИЗЛУЧЕНИЯ ГОРЯЧИХ ДЫРОК В ГЕРМАНИИ В СИЛЬНЫХ $\vec{E} \perp \vec{H}$ ПОЛЯХ

В.Н. Мурзин, А.П. Чеботарев

Впервые измерен спектр стимулированного длинноволнового ИК излучения горячих дырок p-Ge в скрещенных полях E и H. Обнаружено, что спектр излучения состоит из нескольких линий, обусловленных переходами между верхними ветвями валентной зоны германия в условиях квантования подзоны легких дырок. Изучены закономерности изменения спектра генерации при изменении E и H.

Интерес, проявляемый в последние годы к изучению горячих дырок в кристаллах типа германия, связан в первую очередь с возникновением эффектов накопления носителей в сильных $\vec{E} \perp \vec{H}$ полях и возможностью достижения инверсии функций распределения и получения лазерной генерации на прямых оптических переходах между подзонами тяжелых (1) и легких (2) дырок /1/. В прежних работах, в том числе выполненных с участием авторов, по спонтанному субмиллиметровому излучению, обусловленному переходами 2-1 /2 - 4/, и по циклотронному резонансу /5/ было установлено существование эффекта накопления носителей в p-Ge в $\vec{E} \perp \vec{H}$ полях, изучены закономерности этого явления и достигнуто инверсное распределение дырок по отношению к переходам между верхними ветвями валентной зоны германия /3,4/. Была показана важность устранения продольной по магнитному полю составляющей электрического поля, исследовано влияние конфигурации образцов и определены оптимальные, с точки зрения инверсии и коэффициента усиления, значения концентрации примесей и интервал напряженностей полей E и H /4/. На образцах p-Ge с концентрацией примесей $N_A = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ размерами $20 \times 3 \times 6 \text{ мм}^3$ в полях $E = 1,5 - 2 \text{ кВ/см}$, $H = 10 - 15 \text{ кЭ}$ были достигнуты значения коэффициента индуцированного усиления $a \cong 0,02 - 0,04 \text{ см}^{-1}$ в области дырочных переходов 1-2 ($\lambda = 80 - 100 \text{ мкм}$), достаточные для получения лазерного эффекта /4/.

В настоящей работе сообщаются результаты по наблюдению генерации и изучению спектрального состава стимулированного субмиллиметрового излучения p-Ge в сильных скрещенных электрическом и магнитном полях. Генерация получена на прямоугольных образцах p-Ge ($N_A = 10^{14} \text{ см}^{-3}$) размером $30 \times 3 \times 6 \text{ мм}^3$, изготовленных с высокой степенью параллельности боковых граней, при выполнении отмеченных выше оптимальных с точки зрения эффекта условий с учетом данных исследований /6,7/. Постоянное магнитное поле направлялось вдоль образца, а электрическое прикладывалось к узким граням ($\vec{H} \parallel [111]$, $\vec{E} \parallel [110]$). Таким образом была реализована "холловская" конфигурация эксперимента, уменьшающая влияние продольной $\vec{E} \parallel \vec{H}$ составляющей электрического поля. Импульсы E длительностью 10^{-6} с подавались с частотой $\lesssim 1 \text{ Гц}$, при которой перегрев образцов, погруженных в жидкий гелий, не превышал $20 \div 30 \text{ К}$. В экспериментах использовалось специально изготовленное юстировочное устройство, позволявшее варьировать угол между \vec{E} и \vec{H} изменением наклона образца относительно \vec{H} внутри сверхпроводящего соленоида.

Лазерная генерация регистрировалась по резкому (на несколько порядков) возрастанию интенсивности субмиллиметрового излучения образцов p-Ge в некотором интервале значений полей E и H. Мощность излучения в импульсе составляла $\sim 1 \text{ Вт}$. Излучение поляризовано преимущественно вдоль $[\vec{E} \times \vec{H}]$. Спектральный состав лазерного излучения p-Ge, измеренный с помощью дифракционного длинноволнового ИК спектрометра ДИКС ФИАН (на выходе которого помещался охлаждаемый гелием приемник Ge(Ge₂), показан на рис. 1. Видно, что излучение наблюдается лишь в определенном интервале магнитных полей $14 \div 19,5 \text{ кЭ}$ (при $E = 1,8 \text{ кВ/см}$) и характеризуется линией с частотой порядка 100 см^{-1} (длина волны $\sim 100 \text{ мкм}$, заштрихована на рисунке). Ширина линии меняется в зависимости от значений H и составляет 8 см^{-1} при 14 кЭ , 16 см^{-1} при 18 кЭ , 10 см^{-1} при $19,5 \text{ кЭ}$. С ростом H линия смещается

в коротковолновую сторону и при некоторых значениях N начинает уменьшаться по интенсивности. В полях $N \geq 16$ кЭ с длинноволновой стороны появляется другая линия, которая с ростом N также сдвигается в коротковолновую сторону, становится более интенсивной, а затем исчезает в полях $N \geq 19,5$ кЭ.

В результате измерений, выполненных при других значениях E , были зарегистрированы дополнительные линии, поведение которых в зависимости от N было примерно таким же, как у описанных выше линий. Спектральное положение обнаруженных линий излучения в зависимости от E и N приведено на рис. 2. Частота всех линий линейно растет с увеличением N и практически не зависит от величины E . При изменении E лишь смещается область наблюдения каждой из линий.

Обнаруженные линии излучения, их спектральное положение и зарегистрированные закономерности изменения спектра излучения в полях E и N обусловлены особенностями дырочных переходов между

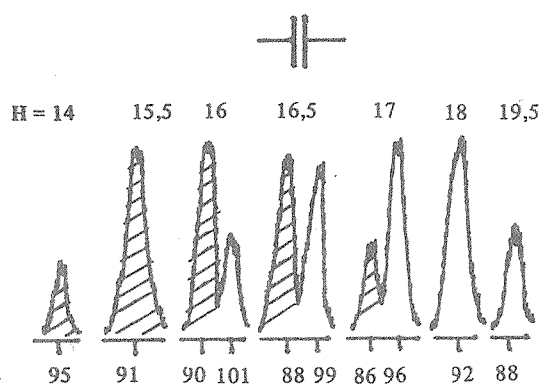


Рис. 1

Р и с. 1. Спектры стимулированного излучения p-Ge в $\vec{E} \parallel \vec{H}$ полях при $E = 1,8$ кВ/см и указанных значениях N , кЭ. Внизу обозначено спектральное положение линий генерации (в мкм).

Р и с. 3. Пример записи вращательного спектра поглощения паров воды в атмосфере в области генерации p-Ge. Справа вверху — форма импульса электрического поля.

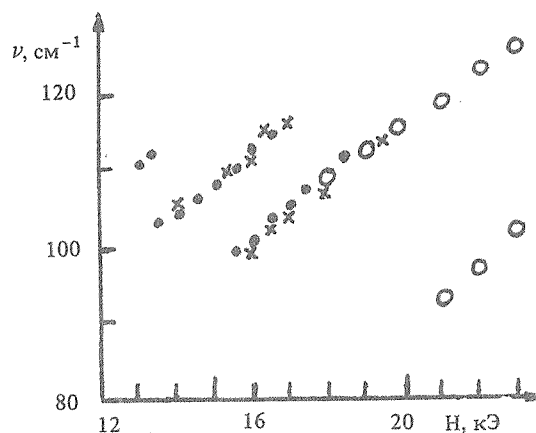


Рис. 2

Р и с. 2. Зависимость спектрального положения линий генерации от значения N при $E = 1,7$ кВ/см (точки), $1,8$ кВ/см (крестики) и $2,4$ кВ/см (кружки).

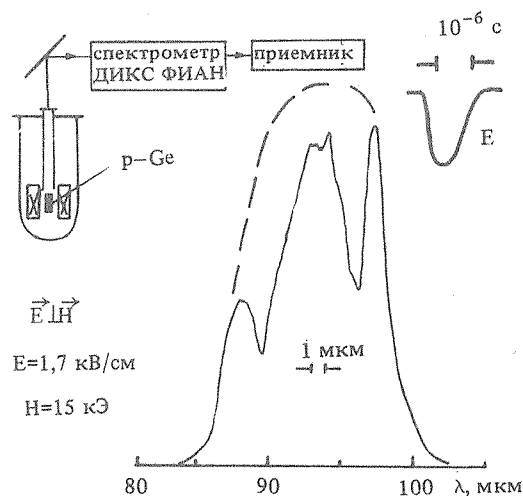


Рис. 3

верхними ветвями валентной зоны Ge при учете квантования движения легких дырок*), приводящего к образованию многогорбой функции распределения за счет небольшого числа замкнутых траекторий в области накопления, соответствующих уровням Ландау. Энергетическое расстояние между линиями порядка $\hbar\omega_c$ ($\hbar\omega_c \cong 30 \text{ см}^{-1}$ при 15 кЭ). Сдвиг линий в коротковолновую сторону с ростом H свидетельствует о том, что относительный вклад, обусловленный дрейфовой скоростью $v_{gr} = cE/H$, в условиях экспериментов оказывается мало существенным. Для детальной интерпретации полученных данных требуются дополнительные измерения и подробный теоретический анализ, учитывающий, в частности, дырочные переходы при $p_z \neq 0$. Ширина линий излучения значительно превышает разрешение спектрометра и, видимо, определяется в первую очередь видом функции распределения и качеством резонатора (которым служит сам кристалл). Влияние формы импульса E (рис. 3) на ширину линии излучения оказывается несущественным. На рис. 3 приведен спектр излучения, прошедшего слой воздуха толщиной 4 см. Наблюдаемая на рис. 3 структура обусловлена вращательным спектром H_2O в атмосфере.

Следует отметить, что генерация вынужденного излучения p-Ge наблюдалась лишь при весьма значительном ($\sim 5^\circ$) отклонении оси образца от направления магнитного поля (в плоскости \vec{E}, \vec{H}). Нам представляется, что этот эффект связан с анизотропией проводимости p-Ge в сильных E полях, обусловленной гофрировкой валентной зоны германия.

Авторы выражают благодарность А.А. Андронову, В.Н. Шастину, С.А. Павлову и Ю.Н. Ноздрину за полезные обсуждения и помощь при подготовке данных экспериментов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инвертированные распределения горячих электронов в полупроводниках. Сб. трудов под ред. А.А. Андропова, Ю.К. Пожелы, ИПФ АН СССР, Горький, 1983.
2. Гавриленко В. И. и др. Письма в ЖЭТФ, 35, 81 (1982).
3. Андронов А. А. и др. ДАН, 267, 339 (1982).
4. Гавриленко В. И., Мурзин В. Н., Чеботарев А. П. В сб. Инвертированные распределения горячих электронов в полупроводниках, Сб. трудов, ИПФ АН СССР, Горький, 1983, с. 100.
5. Ефимов Ю. А. и др. Препринт ФИАН № 52, М., 1985.
6. Андронов А. А. и др. Письма в ЖЭТФ, 40, 69 (1984).
7. Komiyama S., Lizuka N., Akasaka Y. Appl. Phys. Lett., 47, 958 (1985).

Поступила в редакцию 30 января 1986 г.

*) Квантованием тяжелых дырок в рассматриваемых полях E и H можно пренебречь.