

ДВУХФОТОННОЕ СЕЛЕКТИВНОЕ ЗАПОЛНЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ДОЛИН В РЬ ТЕ И СКАЧКИ НАПРАВЛЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИИ РЕКОМБИНАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

*И.П. Арешев, А.М. Данишевский, С.Ф. Кочегаров,
В.К. Субашиев*

Сообщается о наблюдении линейно поляризованного стимулированного рекомбинационного излучения (РИ) из кристалла теллурида свинца при двухфотонной накачке линейно-поляризованным излучением с длиной волны 10,6 мкм. При небольших изменениях направления поляризации излучения накачки (ИН) (в диапазоне $-8 \div +8^\circ$) в плоскости (100) кристалла относительно направления [010] направление поляризации РИ претерпевает скачок на $\sim 90^\circ$. При изменении направления поляризации ИН в пределах $-45 \div 0^\circ$ степень поляризации РИ изменяется в пределах от 0,85 до 0,15. Указанные факты объясняются возникновением селективной населенности энергетических долин.

В работе [1] нами сообщалось о наблюдении стимулированного рекомбинационного излучения (РИ) из кристаллов теллурида свинца, возбуждающихся квантами излучения импульсного CO_2 лазера ($\lambda = 10,6$ мкм).

Изменение направления линейной поляризации излучения накачки вызвало существенное до (15 раз) изменение общего выхода РИ. Указанный эффект объяснялся: 1) сильной зависимостью темпа возбуждения носителей при двухфотонном поглощении (ДФП) в различные долины энергетического спектра¹⁾ теллурида свинца от направления поляризации накачки, 2) отсутствием при достаточно низких температурах процессов междолинного переброса²⁾ и 3) возникновением стимулированного излучения. В частности, из выражения (1) в работе [1] следует, что в случае, когда излучение накачки распространяется в направлении, совпадающим с осью [100], и направление поляризации излучения накачки оказывается под углом 45° к оси [010], темп возбуждения в две долины (например, [1, -1, 1] и [-1, 1, 1]) превосходит темп возбуждения в две другие долины ([1, 1, 1] и [-1, -1, 1]) в 6,25 раз.

При повороте плоскости поляризации накачки на 90° соотношение темпов генерации носителей в указанные долины оказывается обратным. В случае же, когда направление поляризации совпадает с осью [010], темп возбуждения во все четыре долины должен быть одинаков.

Наличие селективной населенности энергетических долин должно приводить к поляризованности РИ. При этом степень и направление поляризации должны существенно зависеть от направления поляризации излучения накачки.

Эксперимент по обнаружению указанного эффекта выполнялся на образце n -РЬ Те ($n = 4 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$) в виде пластинки толщиной $\sim 1 \text{ мм}$, свободно закрепленной и помещенной в жидкий Не при температуре 4,2К. Поверхности пластинки были после травления матовыми и не параллельными. Луч импульсного CO_2 лазера направлялся по оси [100] кристалла. Излучение лазера было линейно поляризованным. Излучение из кристалла регистрировалось в направлении [100] с передней поверхности образца в телесном угле $\sim 22^\circ$ ($\sim 4^\circ$ в кристалле). Рекомбинационное излучение фокусировалось и направлялось непосредственно на фотоприемник (Ge: Au при 77К). Измерялись зависимости выходящего потока РИ $-I_{\text{ри}}$ от интенсивности излучения накачки $j_{\text{н}}$ (рис.1). При наименьших значениях $I_{\text{ри}}$, которые удавалось зарегистрировать, зависимость $I_{\text{ри}}$ ($j_{\text{н}}$) оказалась чрезвычайно резкой ($I_{\text{ри}} \sim j_{\text{н}}^{2.0}$). Таким образом, даже в отсутствие резонатора имеется очень большое усиление РИ в кристалле и наблюдаемое излучение является стимулированным.

¹⁾ Теллурид свинца является кубическим кристаллом с многодолинным энергетическим спектром. Долины вытянуты вдоль направлений [111] в кристалле. Степень анизотропии приведенной эффективной массы носителей заряда $\gamma = m_{\parallel} / m_{\perp}$ по данным работы [2] равна $\sim 11,4$.

²⁾ Минимальная энергия "междолинных фононов" в РЬ Те составляет $\sim 3,2 \text{ мэв}$ [3]. Поэтому междолинный переброс, обусловленный фононным рассеянием при низких температурах подавлен. Междолинные же переходы (МДП) за счет рассеяния на примесных центрах и за счет процессов "резмиссии" [4] в теллуриде свинца малоэффективны в связи с большим значением диэлектрической постоянной $\epsilon = 400$ и очень малой энергией ионизации мелких примесных уровней.

Далее перед приемником устанавливался анализатор (дифракционная решетка на полиэтилене) и измерялись поляризационные характеристики РИ. С целью проверки отсутствия внутренних напряжений в кристалле измерялась поляризованность РИ при циркулярной накачке. Линейная поляризация в РИ не была обнаружена. Затем на лазерный пучок устанавливалась полуволновая фазовая пластинка, излучение после которой было линейно поляризованным и осуществлялся поворот плоскости поляризации излучения накачки¹⁾. В этом случае РИ оказалось существенно линейно-поляризованным. На рис. 2 показаны полученные зависимости направления (ψ_m) и степени (ρ) линейной поляризации РИ от направления поляризации излучения накачки ϕ . Углы ϕ и ψ_m отсчитываются от направления $[010]$ в кристалле в плоскости (100) . Из рис. 2 видно, что направление поляризации РИ изменяется скачком от $\psi_m \approx -45^\circ$ до $\psi_m = 45^\circ$ при изменении угла ϕ в пределах $-8 \div 8^\circ$. Степень поляризации РИ уменьшается от $\rho = 0,85$ при $\phi = -45^\circ$ до значения $\rho \approx 0,14$ при $\phi = -1^\circ$.

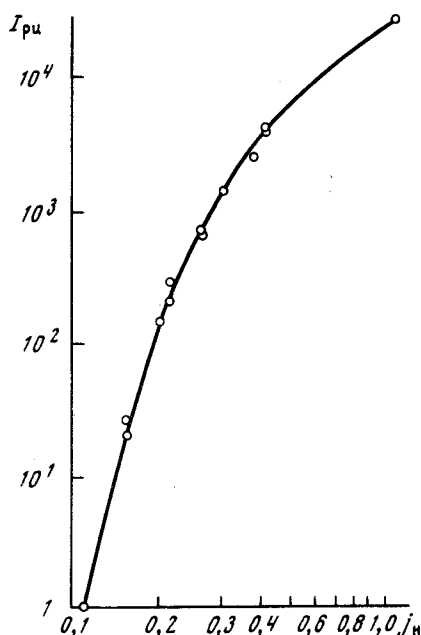


Рис. 1. Зависимость величины потока рекомбинационного излучения от интенсивности излучения накачки j_n . Максимальное значение j_n соответствует абсолютной интенсивности $(7,5 \pm 5) \cdot 10^{25}$ кват/см²сек

Нетрудно показать, что степень и направление поляризации РИ должны зависеть не только от направления возбуждения, но и от направления наблюдения РИ по отношению к осям кристалла.

Связь между сигналом РИ — $I_{ри}$, направлением поляризации накачки ϕ и положением анализатора перед фотоприемником ψ в использован-

¹⁾ Изменение интенсивности накачки при повороте фазовой пластины не превышало 1,0%.

ной геометрии эксперимента для спонтанной межзонной рекомбинации, возбужденной за счет ДФП излучения накачки и в отсутствие МДП, может быть получена в виде следующего выражения

$$I_{\text{ри}} \sim \left\{ \left[1 - \frac{\alpha}{3} (1 + \sin 2\psi) \right] \left[1 - \frac{\alpha}{3} (1 + \sin 2\phi) \right]^{2n} + \left[1 - \frac{\alpha}{3} (1 - \sin 2\psi) \right] \times \right. \\ \left. \times \left[1 - \frac{\alpha}{3} (1 - \sin 2\phi) \right]^{2n} \right\}, \quad (1)$$

где $\alpha = \frac{\gamma - 1}{\gamma}$; $n = 1, 2$ для линейной и квадратичной рекомбинации соответственно.

Из выражения (1) следует, что в случае, когда излучает только одна пара долин и поток РИ измеряется в направлении $[\bar{1}00]$, степень поляризации РИ $\rho = 0,437$.

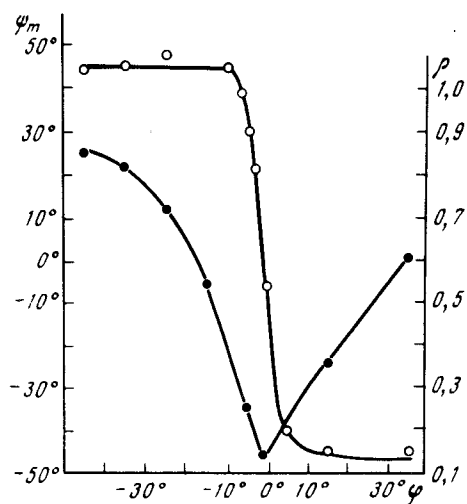


Рис. 2. Зависимость направления и степени поляризации рекомбинационного излучения от направления поляризации излучения накачки. ϕ , ψ_m — углы между осью $[010]$ кристалла и направлением поляризации излучения накачки и рекомбинационного излучения соответственно. Излучение накачки направлено по оси $[100]$ кристалла. ρ — степень поляризации рекомбинационного излучения \circ — $\psi_m(\phi)$, \times — $\rho(\phi)$

В эксперименте (рис. 1,2) наблюдалось стимулированное излучение и при этом значения ρ изменялись вплоть до 0,85. Данный факт указывает на то, что даже в отсутствие резонатора в кристалле имеется весьма значительное усиление поляризационных мод.

Из (1) следует также, что в случае, когда направление поляризации излучения накачки образует с осью $[010]$ кристалла угол 45° ($\phi = -45^\circ$, 45° на рис. 2), направление поляризации РИ (ψ_m) должно совпадать с направлением поляризации излучения накачки. Из данных, приведенных на рис. 2, видно, что такое совпадение действительно имеется.

Обращает на себя внимание тот факт, что изменение направления поляризации РИ на 90° происходит не совсем резким скачком и в переходной области значений ϕ имеются промежуточные направления поляризации ψ_m . Если бы излучение из обеих пар долин осуществлялось независимо, направление поляризации РИ определялось бы той парой долин, темп возбуждения в которые при данном значении ϕ оказывается выше. В

этом случае могло быть только два состояния поляризации $\psi_m = -45^\circ$ и $\psi_m = 45^\circ$. Наличие промежуточных направлений поляризации может, в принципе, объясняться небольшим отклонением плоскости образца от плоскости (100) кристалла. Другое возможное объяснение заключается в том, что поскольку излучение одной пары долин частично стимулирует рекомбинацию в другой паре долин и наоборот, осуществляется взаимная фазировка излучения.

Авторы благодарны Е.Л.Ивченко за полезное обсуждение затронутых в работе вопросов и Л.С.Вороной за помощь при проведении эксперимента.

Физико-технический институт
им. А.Ф.Иоффе
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
16 октября 1976 г.

Литература

- [1] И.П.Арешев, А.М.Данишевский, С.Ф.Кочегаров, В.К.Субашиев. Письма в ЖЭТФ, 22, 437, 1975.
 - [2] Ю.И.Равич, Б.А.Ефимова, И.А.Смирнов. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe, PbS. М., изд. Наука, 1968.
 - [3] G.W.Pratt, Jr. Mc Mullin, P.G.Mc Mullin. "Proc. of the tenth International Conference on the Physics of Semiconductors" Cambridge, Massachusetts, 1970, p. 87.
 - [4] G.Weinreich, T.M.Sanders, Irand H.G.White, Phys. Rev. 114, 33, 1959.
-