

О МОДУЛЯЦИИ ЛАЗЕРНОГО ДЕЙСТВИЯ В ТЕЛЛУРИДЕ СВИНЦА ИЗМЕНЕНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ НАКАЧКИ

И.Н.Арешев, А.М.Данишевский, С.Ф.Кочегаров

В.К.Субашев

В настоящей работе сообщается об обнаружении эффекта глубокой модуляции лазерного действия в теллурите свинца (PbTe) при 20 K , возникающего при двухфотонной накачке излучением CO_2 -лазера при вращении направления линейной поляризации направленного на кристалл излучения. Предлагается объяснение полученного эффекта.

Лазерное действие в кубическом многодолинном полупроводнике PbTe наблюдалось в работах [1, 2]. В [2] лазерное действие в теллурите свинца осуществлялось при двухфотонной ($\Delta\Phi$) накачке излучением импульсного CO_2 -лазеара.

В настоящей работе обнаружен эффект модуляции лазерного действия в PbTe при изменении поляризации излучения накачки.

Образец PbTe n -типа ($n \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$) в виде плоскопараллельной полированной пластиинки, вырезанной в плоскости **(001)** кристалла, наклеивался на тонкую сапфировую подложку, которая, в свою очередь, приклеивалась на охлаждаемый "налед" гелиевого криостата. Линейно поляризованное излучение CO_2 -лазера ($\lambda = 10,6 \mu\text{мм}$) в виде коротких импульсов ($t_i \sim 120 \text{ нсек}$) использовалось для двухфотонного объемного возбуждения кристалла в направлении **[001]**. Люминесценция измерялась с передней поверхности кристалла в сравнительно небольшом телесном угле $\sim 20^\circ$ (что соответствует углу в кристалле $< 4^\circ$). Излучение из кристалла направлялось непосредственно на фотоприемник (Ge : Au при 77K) и далее синхронно детектировалось. Измерялись зависимости полного выхода люминесценции I_L от интенсивности излучения накачки j_H и от направления ϕ его поляризации. На рис. 1 приведена первая из указанных характеристик. При малых интенсивностях возбуждающего излучения имеется квадратичный участок в зависимости $I_L(j_H)$, с увеличением j_H происходит резкое нарастание выхода рекомбинационного излучения из кристалла и I_L при этом пропорциональна $\sim j_H^8$. Такой характер зависимости $I_L(j_H)$ говорит о переходе к лазерному действию¹⁾.

Далее было обнаружено, что вклад люминесценции и наличие лазерного действия существенно зависят от направления поляризации излучения накачки. На рис. 2 приведена указанная зависимость. Видно, что экспериментальная кривая представляет собой как бы две периодичес-

¹⁾ Аналогичная зависимость вместе с резким сужением спектра люминесценции из PbTe наблюдалась в [2].

кие функции с периодом 180° , наложенные одна на другую и сдвинутые по фазе на 90° . Причем отношение максимальных значений сигналов люминесценции к минимальным находится в пределах от 6 до 15. Следует подчеркнуть, что зависимость $I_L(\phi)$ снималась при интенсивностях накачки лишь немного ($\sim 1,06$ раз) превышающих порог лазерного действия.

Для объяснения полученного эффекта необходимо рассмотреть, как изменяется темп генерации носителей в различные долины зон "с" "v" с изменением направления поляризации накачки.¹

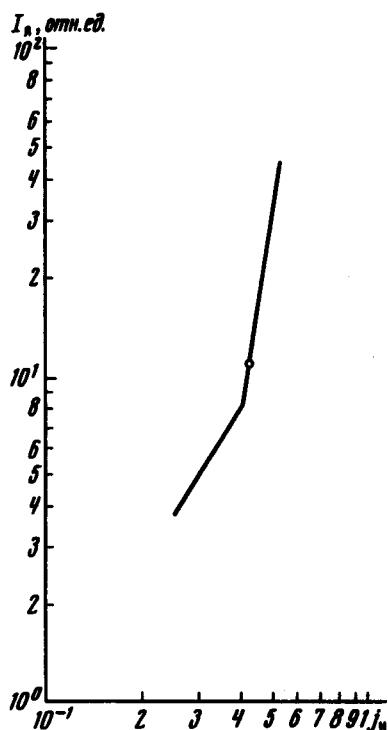


Рис. 1. Зависимость выхода люминесценции от интенсивности накачки. 20К, n -PbTe. Точкой отмечено значение j_{II} , при котором снималась зависимость $I_L(\phi)$

Используя выражение для вероятности ДФ поглощения в PbTe, приведенные в [3], можно показать, что в случае линейно-поляризованного излучения накачки, когда луч лазера перпендикулярен плоскости (001) кристалла, темп генерации носителей G пропорционален:

$$G \sim \left[1 - \frac{2}{3} \alpha + \frac{1}{6} \alpha^2 \pm \frac{2}{3} \alpha \left(1 - \frac{1}{3} \alpha \right) \sin 2\phi - \frac{\alpha^2}{18} \cos 4\phi \right], \quad (1)$$

где знак (-) для долин, вытянутых вдоль направлений $<1, 1, 1, >$ и $<-1, -1, 1, >$, а (+) для долин в направлениях $<1, -1, 1, >$ и $<-1, 1, 1, >$. Здесь $\alpha = (m_{\text{II}} - m_{\text{I}})/m_{\text{II}} \sim 0,9$ [4]; m_{II} и m_{I} – продольная и поперечная эффективные массы носителей у дна зоны проводимости, ϕ – угол между вектором поляризации излучения накачки и осью [100] кристал-

ла. Из выражений (1) видно, что, например, при $\phi = \pi/4$ темп генерации носителей в долины $<1, -1, 1>$ и $<-1, 1, 1>$ в 6,25 раза превосходит темп генерации в долины $<1, 1, 1>$ и $<-1, -1, 1>$. При повороте вектора поляризации на 90° – ситуация обратная.

Таким образом, при достижении некоторой интенсивности накачки при $\phi = \frac{\pi}{4} (4n + 1)$, ($n = 0, 1, 2$) концентрация носителей в одной паре

долин ($<1, -1, 1>$ и $<-1, 1, 1>$) становится достаточной для возникновения лазерного действия, тогда как в другой паре долин ($<111>$ и $<-1, -1, 1>$) порог генерации еще не достигается. При этом время жизни носителей τ в первой паре долин становится очень малым, меньшим времени междолинной релаксации $\tau_{\text{мдп}}$ [5] и обмен носителями между указанными парами долин невелик. Происходит высвечивание

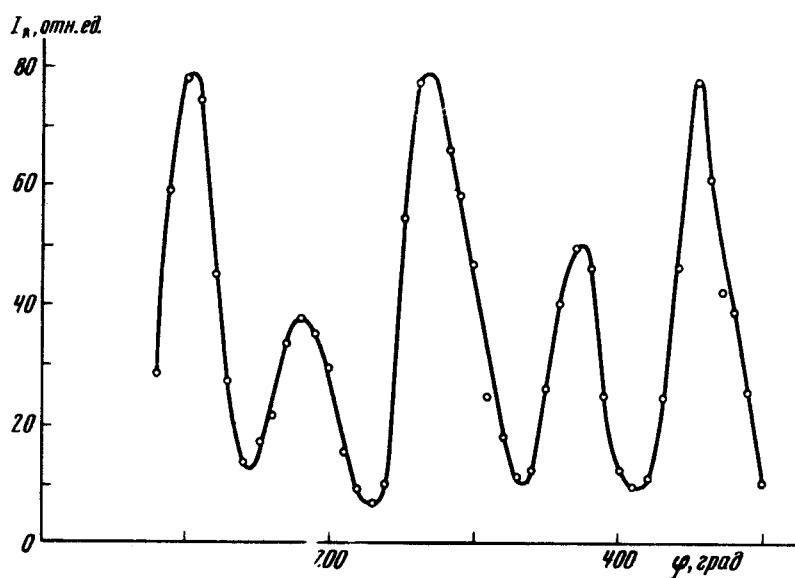


Рис. 2. Зависимость выхода люминесценции от направления линейной поляризации накачки

долин $<1, -1, 1>$ и $<-1, 1, 1>$. При повороте вектора поляризации на 90° , аналогичный эффект должен иметь место для другой пары долин. Таким образом, выход люминесценции должен периодически изменяться с направлением поляризации накачки с периодом $\pi/2$.

Необходимо, однако, отметить, что в эксперименте максимумы I_L , отстоящие на 90° , неравны по величине. В связи с этим было сделано предположение о том, что кристалл несколько деформируется при низких температурах за счет приклейки его на подложку. Для проверки этого предположения был выполнен следующий опыт: измерялась поляризация люминесценции при циркулярной накачке с интенсивностями меньшими порога лазерного действия. Оказалось, что рекомбинационное излучение частично поляризовано (степень поляризации $\rho = 0,184$). Указанный факт свидетельствует об одноосной деформации кристалла.

Одноосная деформация по оси [110] приводит к тому, что долины в зонах "с" и "в" смещаются по энергии таким образом, как это показано на рис. 3. При этом в случае, если $\tau_{\text{МДП}}$ одного порядка с τ , часть носителей из долин 1, 2 (рис. 3) валентной зоны может перейти в долины 3; 4¹⁾ и люминесценция окажется частично поляризованной.

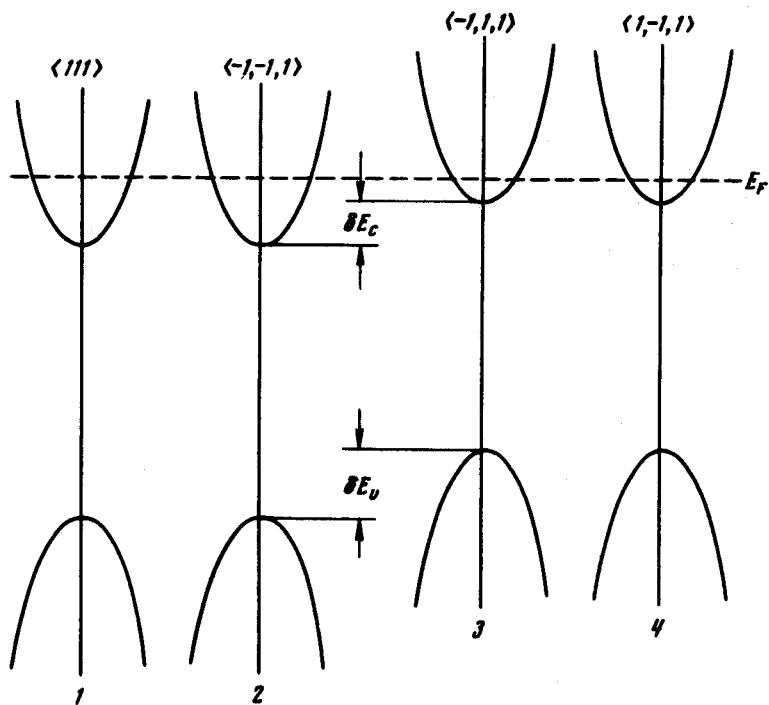


Рис. 3. Структура зон в деформированном кристалле PbTe. Направление деформации [011]. При $p = 200 \text{ кг/см}^2$, $\delta E_c = 4,2 \text{ мэв}$, $\delta E_v = 5,3 \text{ мэв}$

Отсюда следует, что при направлении линейной поляризации накачки, обеспечивающем максимальный темп заброса в долины 1, 2 и превышение над порогом лазерного действия, стационарная концентрация в них будет меньше, чем в отсутствии деформации. При наличии деформации концентрация в долинах 1 и 2 будет меньше, чем в долинах 3, 4. в случае, когда максимальный темп генерации осуществляется в последние долины. Этим обстоятельством и можно объяснить различную амплитуду максимумов, сдвинутых на 90° на рис. 2.

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

Поступила в редакцию
1 сентября 1975 г.

¹⁾ Междолинные переходы (МДП) могут эффективно происходить лишь в том случае, если разность квазиуровней Ферми составляет более, чем $\sim 3 \text{ мэв}$, поскольку эта величина является минимальной энергией фонона (002), имеющего волновой вектор, достаточный для совершения МДП [5].

Литература

- [1] F.A.Junga, K.F.Cuff, I.S.Blakemore, E.R.Waschwell, Phys. Lett., 13, 103, 1964.
 - [2] C.K.N.Patel, P.A.Fleury, R.E.Slusher, H.L.Frish. Phys. Rev. Lett., 16, 971, 1966.
 - [3] Е.Л.Ивченко. ФТТ, 14, 3489, 1972.
 - [4] Ю.И.Равич, Б.А.Ефимова, И.А.Смирнов. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe, PbS. М., изд. Наука, 1968.
 - [5] G.W.Pratt, Jr Mc Mullin, P.G.Mc Mullin." Proc. of the tenth International Conference of the Physics of Semiconductors" Cambridge, Massachusetts, 1970 г., p. 87.
-