

МЕЖЗОННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ГОРЯЧИХ ДЫРОК В Ge ПРИ ОДНОСНОМ СЖАТИИ

И.В.Алтухов, М.С.Каган, В.П.Синис

Обнаружено дальнейшее ИК излучение горячих дырок в Ge, вызванное оптическими переходами из зоны тяжелых дырок в зону легких, расщепленных одноосным сжатием. При пороговых значениях электрического поля и давления обнаружено возникновение излучения, имеющего стимулированный характер, с интенсивностью до 10^3 раз больше спонтанного.

В последнее время широко исследуются излучательные переходы между различными ветвями валентной зоны p -Ge. Это обусловлено обнаруженным стимулированным излучением в сильном электрическом и сильном магнитном полях ¹. В настоящей работе приведены данные об излучении горячих дырок в p -Ge при одноосном сжатии в отсутствие магнитного поля.

Исследовались кристаллы бездислокационного p -Ge с концентрацией Ga $\sim 2 \cdot 10^{14}$ см⁻³. Образцы вырезались в виде тонких призм квадратного сечения с поперечным размером 0,7 – 1,25 мм и длиной в направлении $\{111\}$ от 5 до 10 мм. Параллельность граней была не хуже 4'. Деформация производилась вдоль оси призмы. Для плавного изменения давления в качестве груза использовался сосуд, заполнявшийся водой ², что позволяло производить запись сигнала до давлений ~ 12 кбар. В качестве приемника излучения использовался охлаждаемый Ge : Ga с полосой чувствительности 80 – 120 мкм. Фотоприемник, образец и размещенные между ними фильтры из кварца, тефлона и InSb, ограничивающие спектральный диапазон засветки приемника, находились в жидком гелии. Фильтр из InSb с концентрацией $\sim 10^{14}$ см⁻³ позволял также устранить электрические наводки на цепь приемника. Импульсы напряжения, длительностью 0,2 – 1 мкс подводились к кольцевым контактам из In, нанесенным по периметру узкого сечения образца. Расстояние между контактами составляло 3 – 7 мм. Измерения проводились при полях, превышающих порог примесного пробоя, так что концентрация дырок, определяемая полной концентрацией примеси, была постоянна, а зависимость тока от напряжения обусловлена полевой зависимостью эффективной подвижности дырок. При увеличении давления ток через образец всегда растет, однако не более чем в 1,5 раза, причем в больших полях этот рост существенно ослабляется.

Интенсивность спонтанного излучения из образца в зависимости от величины одноосного сжатия показана на рис. 1 при разных значениях приложенного напряжения. В электрическом поле $E < 1$ кВ/см интенсивность излучения уменьшалась при больших деформациях. В полях $E \geq 1$ кВ/см, начиная с давления 4 – 5 кбар, наблюдался рост сигнала. Этот рост мы связываем с увеличением заселенности зоны тяжелых дырок в электрическом поле.

Одноосная деформация снимает вырождение валентной зоны Ge при $k = 0$, а основная концентрация дырок сосредоточена в нижней по энергии зоне, где они имеют меньшую эффективную массу. Эффективные массы при сжатии p -Ge в направлении $[111]$ (малые энергии): $m_{\parallel}^{(1)}/m_0 = 0,041$, $m_{\perp}^{(1)}/m_0 = 0,13$, $m_{\parallel}^{(2)}/m_0 = 0,483$, $m_{\perp}^{(2)}/m_0 = 0,053$. Использовались следующие параметры валентной зоны Ge (в эВ): $A = -13,27$, $B = -8,63$, $D = -19,4$ ³. Под действием электрического поля легкие дырки, разогреваясь, переходят в выше лежащую зону с большей массой. Уже при полях ~ 50 В/см (¹ с. 69, 100) начинается баллистический разогрев легких дырок до энергий порядка энергии оптического фона ($\hbar \omega_0 = 37$ мэВ в Ge), т. е. легкие дырки имеют достаточную энергию для перехода в верхнюю подзону. Возможные оптические переходы между ветвями валентной зоны при одноосной деформации показаны на рис. 2. Дисперсионные кривые рассчитаны для $P =$

$= 3$ кбар по формуле (30.5) книги ³ при значениях констант деформационного потенциала $a = -2,09$ эВ, $d = -4,5$ эВ и упругой константы $S_{44} = 1,5 \cdot 10^{-11}$ Н/м². В отсутствие деформации могут наблюдаться только переходы типа I (¹, с. 100, 172); их интенсивность с ростом давления должна падать из-за уменьшения концентрации легких дырок в области энергий кванта излучения, попадающих в полосу чувствительности фотоприемника. Другим механизмом может быть внутризонное рассеяние горячих дырок (¹, с. 100), которое с ростом давления также должно уменьшаться в сильном электрическом поле. Поэтому рост интенсивности излучения при увеличении давления, наблюдающийся в сильных полях (рис. 1), по-видимому, вызван включением оптических переходов II. Ясно, что эти переходы можно наблюдать только при достаточно большом давлении; когда энергетическое расщепление зон попадает в полосу чувствительности приемника, и при достаточно больших полях, обеспечивающих необходимое накопление тяжелых дырок. Энергия расщепления $\delta E_{1,2} = (d/\sqrt{3})S_{44}P$ при $P \parallel [111]$, что дает коэффициент $3,9$ мэВ/кбар. Поэтому уже при $P > 2,5$ кбар $\delta E_{1,2}$ больше, чем энергия кванта излучения, попадающая в полосу чувствительности фотоприемника.

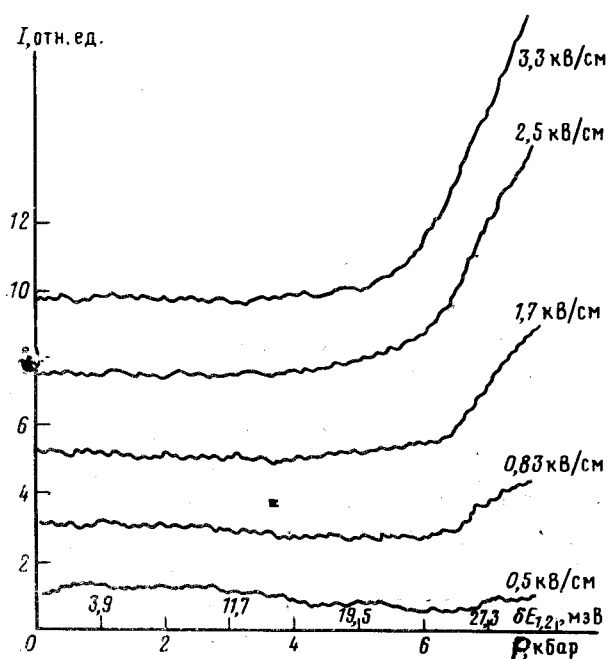


Рис. 1. Зависимость интенсивности излучения от давления при разных напряжениях на образце

Для проверки этих рассуждений мы исследовали спонтанное излучение из тех же образцов, когда давление по-прежнему было приложено в направлении $[111]$, а электрическое поле $E \perp [111]$. В этом случае эффективная масса проводимости (в направлении поля) в зоне легких дырок оказывается больше, чем для тяжелых ³, и существенно ухудшаются условия разогрева дырок нижней зоны и, следовательно, ослабляется накопление дырок в верхней зоне. При $E \perp P \parallel [111]$ интенсивность излучения падала с давлением вплоть до $P = 5,5$ кбар при полях до 5 кВ/см.

Таким образом, одноосное сжатие в сильном электрическом поле ($P \parallel E \parallel [111]$) приводит к росту спонтанного излучения, обусловленного оптическими переходами из зоны тяжелых в зону легких дырок.

В ряде кристаллов при полях выше некоторого порогового ($1,5 - 3$ кВ/см для разных образцов) при увеличении давления выше $7,5$ кбар наблюдался скачок излучения (рис. 2), интенсивность которого могла на три порядка превышать интенсивность спонтанного излучения.

Скачок излучения всегда сопровождался резким ростом тока (в несколько раз), который, по-видимому, вызван увеличением концентрации легких дырок. В тех образцах, где не наблюдалось скачка излучения, не было и скачка тока. В двух образцах из исследованной серии,

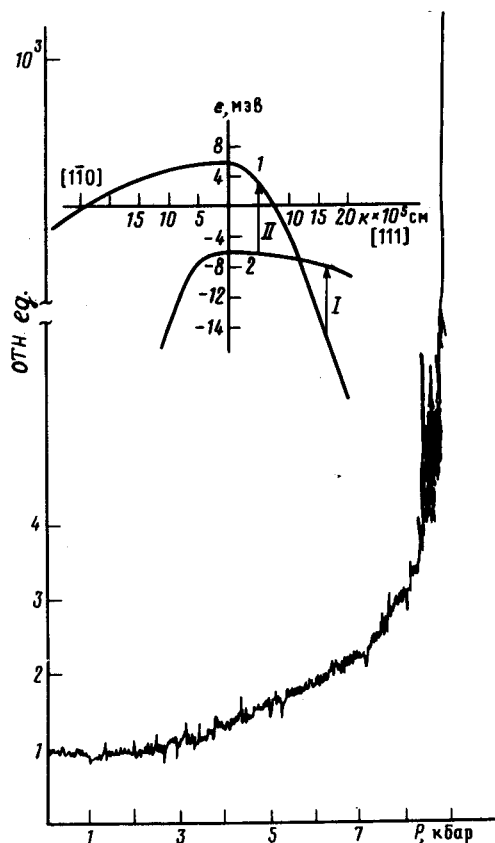


Рис. 2. Возникновение излучения большой мощности и схема оптических переходов

в которых параллельность граней была порядка $20''$, скачок излучения (и тока) наблюдался при напряжении ~ 50 В/см и давлении 4 – 5 кбар. Отметим, что излучение большой мощности возникало только в достаточно длинных образцах (расстояние между токовыми контактами ≥ 5 мм). Можно предположить, что наблюдаемый скачок излучения имеет стимулированный характер, что подтверждается пороговым возникновением этого излучения как по электрическому полю, так и по давлению. Рост спонтанного излучения перед порогом генерации и скачок тока на пороге свидетельствуют о том, что причиной стимулированного излучения является инверсия заполнения зоны тяжелых дырок по отношению к зоне легких дырок. Разумеется, для доказательства стимулированной природы этого излучения необходимы дополнительные исследования.

Авторы признательны Н.Г. Ждановой, С.Н. Иванову, и Я.Е. Покровскому за обсуждение результатов.

Литература

1. Инвертированные распределения горячих электронов в полупроводниках. Сб. научных трудов под ред. Андропова А.А., Пожель Ю.К. ИПФ АН СССР, Горький.
2. Коломоец В.В., Сусь В.А. ПТЭ, 1975, № 4, с. 214.
3. Бир Г.Л., Пикус Г.Е. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. М.: Наука, 1972.

Поступила в редакцию
10 августа 1987 г.
После переработки
10 ноября 1987 г.