

Линейно поляризованное терагерцовое излучение в одноосно деформированном Ge(Ga) при пробое примеси электрическим полем

А. В. Андрианов¹⁾, А. О. Захарьин, И. Н. Ясиевич, Н. Н. Зиновьев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 16 марта 2006 г.

Измерены поляризационные спектры спонтанного терагерцового излучения в одноосно деформированном германии при пробое мелких акцепторов электрическим полем. В спектре излучения обнаружены линии с различной степенью поляризации по отношению к оси давления, относящиеся к оптическим переходам дырок между возбужденными и основным состояниями акцептора, а также к переходам дырок из валентной зоны на основное состояние примеси. При давлении порядка 3 ± 0.3 кбар в направлении [111] вблизи порога примесного пробоя степень линейной поляризации достигает ~ 80 – 90% на основных линиях терагерцового излучения. При возрастании напряженности электрического поля наблюдается деполаризация излучения, обусловленная разогревом неравновесных дырок электрическим полем.

PACS: 07.57.Hm, 78.60.Fi, 78.67.De

Возрастающий интерес к исследованиям электролюминесценции в терагерцовом (ТГц) диапазоне в различных полупроводниковых системах обусловлен потребностями создания эффективных источников электромагнитного излучения в диапазоне частот 0.1–10 ТГц, необходимых для многочисленных приборных применений в различных смежных дисциплинах (биологии, химии, медицине и др.). Системы, использующие излучение при электрическом пробое примесных центров в полупроводниках, могут служить в качестве одной из рабочих схем таких излучателей. ТГц излучение при ударной ионизации мелких примесей в кристаллах типа Ge довольно интенсивно и наблюдается в электрических полях напряженностью в несколько В/см. В [1, 2] был предложен новый тип схемы ТГц лазера, основанной на резонансных состояниях мелкого акцептора в одноосно деформированном германии при электрическом пробое примеси. Хотя ТГц излучение при пробое мелких примесей в германии было обнаружено довольно давно [3], лишь недавно был исследован его спектр в условиях вблизи порога пробоя мелкого акцептора в германии [4]. Изучение поляризационных спектров примесной ТГц электролюминесценции в *p*-Ge при одноосной деформации может дать важную информацию о симметрии состояний, участвующих в оптических переходах. В настоящей работе исследованы поляризационные спектры спонтанной ТГц электролюминесценции в одноосно деформированном Ge(Ga)

в условиях вблизи порога пробоя примеси электрическим полем.

Исследовались образцы Ge(Ga) с удельным сопротивлением $20 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ ($N_A - N_D \sim 1.6 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) в форме прямоугольных параллелепипедов размером $6 \times 1 \times 1$ мм, ориентированных в направлении [111], совпадающем с наибольшим размером. В этом же направлении на одной из боковых граней образца наносились омические контакты на расстоянии 5 мм. Одноосное давление в направлении [111] создавалось за счет того, что исследуемый образец был вмонтирован в оправку из органического стекла, а вся конструкция помещалась в гелиевый оптический криостат и охлаждалась до 5 К. Давление в образце возникало за счет различия термических коэффициентов расширения материала оправки и германия. Направление давления было перпендикулярно оптической оси криостата. Оправка с исследуемым образцом находилась вблизи поверхности жидкого гелия в его парах. Температура в камере с образцом измерялась термопарой Cu/CuFe, один спай которой размещался в непосредственной близости к исследуемому образцу, а второй был помещен в жидкий гелий.

Измерения электролюминесценции проводились с помощью специализированного фурье-спектрометра на область 5 – 350 см^{-1} , описание которого можно найти в работе [5]. Детектором ТГц излучения служил охлаждаемый жидким гелием кремниевый болометр. На исследуемые образцы подавалось напряжение в виде пачек прямоугольных импульсов. Длительность импульсов в пачке 10 мкс, а их частота

¹⁾e-mail: alex.andrianov@mail.ioffe.ru

50 кГц. Длительность пачек 6.2 мс, а частота их следования 80 Гц. Сигнал с детектора измерялся на частоте следования пачек импульсов синхронным детектором SR530.

Перед входным окном фурье-спектрометра устанавливался линейный поляризатор, пропускающий излучение с вертикальной ориентацией вектора поляризации (*S*-поляризация по отношению к светоделителю фурье-спектрометра). Поляризатор имел коэффициенты пропускания ~ 70% для излучения, поляризованного в плоскости его пропускания, и не более 0.1% для излучения, поляризованного в перпендикулярной плоскости. Конструкция держателя образцов криостата позволяла вращать оправку вместе с исследуемым образцом вокруг оптической оси, что в сочетании с поляризатором, установленным на входе фурье-спектрометра, позволяло проводить измерения спектров ТГц электролюминесценции с селекцией поляризации излучения вдоль и поперек оси давления (геометрия $\mathbf{e} \parallel P$ и $\mathbf{e} \perp P$, соответственно).

На рис.1 показан спектр ТГц электролюминесценции одноосно деформированного *p*-Ge(Ga), измеренный

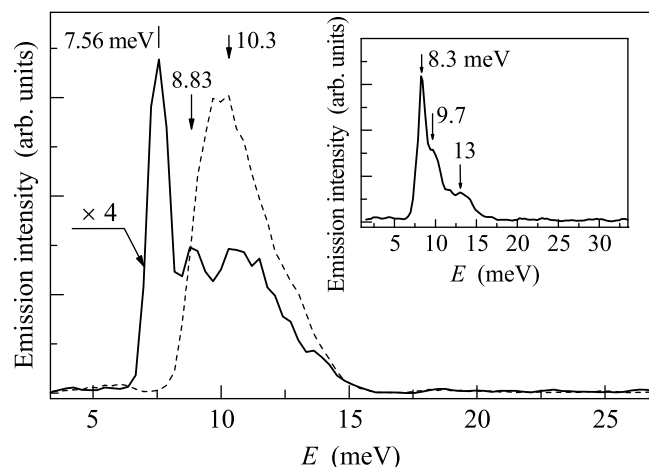


Рис.1. Спектры ТГц электролюминесценции *p*-Ge(Ga), одноосно деформированного в направлении [111]. $T = 5$ К, $E \sim 5.2$ В/см. Спектральное разрешение ~ 0.6 мэВ. Сплошная кривая – спектр излучения, измеренный в геометрии $\mathbf{e} \perp P$, пунктир – спектр, измеренный в геометрии $\mathbf{e} \parallel P$. Величина давления составляет $\sim 3 \pm 0.3$ кбар (см. текст). На вставке показан спектр ТГц электролюминесценции недеформированного *p*-Ge(Ga), измеренный вблизи порога примесного пробоя

ный вблизи порога пробоя примеси при напряженности электрического поля ~ 5.2 В/см. На вставке приведен также спектр ТГц излучения недеформированного образца *p*-Ge(Ga), измеренный вблизи порога

примесного пробоя. Видно, что спектры, измеренные в поляризации излучения вдоль и поперек оси давления, значительно отличаются. Иными словами, ТГц излучение линейно поляризовано и поляризация меняется по спектру. Основная, узкая линия с максимумом при 7.56 мэВ в спектре излучения, наблюдаемом в геометрии $\mathbf{e} \perp P$, поляризована поперек оси давления со степенью поляризации ~ 93%. В спектре присутствуют также узкая линия с максимумом при 8.83 мэВ и широкая, с максимумом при ~ 10.3 мэВ. В спектре ТГц излучения, измеренном в геометрии $\mathbf{e} \parallel P$, доминирует широкая линия с максимумом при ~ 10 мэВ (полуширина ~ 3.3 мэВ), степень поляризации которой вдоль оси давления составляет ~ 80%.

Величина одноосного давления, достигаемого в образце *p*-Ge(Ga), была определена путем измерения спектров ТГц фотопроводимости и сопоставления результатов с данными работы [6]. На рис.2 показан

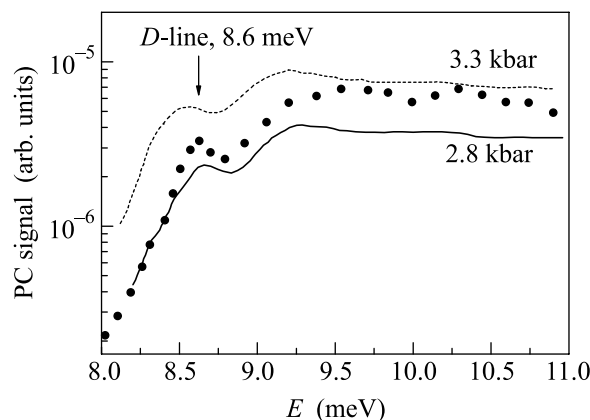


Рис.2. Спектр ТГц фотопроводимости одноосно деформированного в направлении [111] образца Ge(Ga) при $T = 5$ К (точки). Кривые – спектры фотопроводимости из работы [6]: около кривых указано давление в направлении [111]

характерный спектр фотопроводимости одноосно деформированного образца *p*-Ge(Ga) при $T = 5$ К. Положение максимума *D*-линии (наиболее интенсивной низкоэнергетической линии) в спектре фотопроводимости исследуемого образца при ~ 8.6 мэВ свидетельствует о том, что величина давления в направлении [111] составляет ~ 3 ± 0.3 кбар.

D-линия в спектрах поглощения и фотопроводимости [6] одноосно деформированного Ge(Ga) соответствует переходу из основного состояния акцептора $1\Gamma_4^+$ в возбужденное, формирующееся из смеси близких по энергии состояний $2(\Gamma_5^- + \Gamma_6^-)$ и $2\Gamma_4^-$, а также $1\Gamma_4^-$. Здесь и далее используется общепринятая классификация состояний акцептора в кристал-

лах симметрии O_h (см., например, [7, 8]). На рис.3 схематически показана структура уровней (основно-

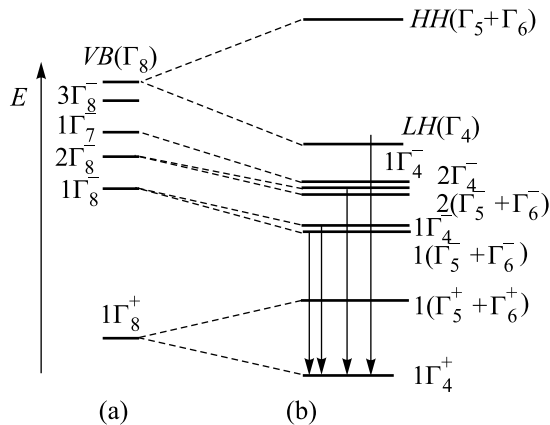


Рис.3. Схематическая картина основного и нескольких возбужденных состояний мелкого акцептора в германии: (а) в отсутствие деформации; (б) в случае одноосной деформации по направлению [111]. Показаны только нечетные возбужденные состояния, поскольку только такие состояния проявляются в оптических переходах. HH и LH соответствуют подзонам тяжелых и легких дырок соответственно. Стрелками показаны оптические переходы, ответственные за наблюдаемое ТГц излучение (см. текст). BV соответствует краю валентной зоны в недеформированном материале

го и нескольких возбужденных состояний) мелкого акцептора в одноосно деформированном германии с учетом результатов работ [7, 8].

Линию с максимумом при 7.56 мэВ (см. рис.1) мы относим к оптическим переходам из возбужденного состояния $1(\Gamma_5^- + \Gamma_6^-)$ акцептора, образующегося из состояния $1\Gamma_8^-$ в результате одноосного давления по направлению [111], в основное состояние акцептора $1\Gamma_4^+$, которое, в свою очередь, образуется из состояния $1\Gamma_8^+$. В пользу такой интерпретации свидетельствует спектральное положение данной линии, согласующееся с результатами расчетов [7], и ее высокая степень линейной поляризации ($\sim 93\%$) перпендикулярно оси давления.

Расчетные значения силы осциллятора в отсутствие давления [9] для оптического перехода $1\Gamma_8^+ \rightarrow 1\Gamma_8^-$ составляют величину почти на два порядка меньше, чем для перехода $1\Gamma_8^+ \rightarrow 2\Gamma_8^-$. Можно предположить, что и в случае одноосного давления силы осциллятора подобных переходов, а именно, $1\Gamma_4^+ \rightarrow 1(\Gamma_5^- + \Gamma_6^-)$ и $1\Gamma_4^+ \rightarrow 2(\Gamma_5^- + \Gamma_6^-)$, будут иметь такое же соотношение. Тот факт, что в спектре ТГц излучения в геометрии $e \perp P$ одноосно деформированного образца доминирующим становится переход $1(\Gamma_5^- + \Gamma_6^-) \rightarrow 1\Gamma_4^+$ свидетельствует о достаточно вы-

сокой заселенности состояния $1(\Gamma_5^- + \Gamma_6^-)$ в условиях эксперимента как наинизшего возбужденного состояния.

Линия с максимумом при 8.83 мэВ обусловлена оптическими переходами на основное состояние акцептора из возбужденных состояний $(\Gamma_5^- + \Gamma_6^-)$ и Γ_4^- , образующихся из состояний $2\Gamma_8^-$ и $1\Gamma_7^-$ в результате давления, и ассоциируется с D -линией в спектрах поглощения [6]. Спектральное положение линии при 8.83 мэВ согласуется с результатами расчетов [7]. Широкую линию излучения с максимумом при ~ 10 мэВ (см. рис.1) мы связываем с переходами неравновесных дырок из валентной зоны (из подзоны Γ_4 , соответствующей “легким” дыркам) на основное состояние акцептора. Интересным и важным фактом является преимущественная поляризация ТГц излучения вдоль оси давления на этой линии.

При возрастании напряженности электрического поля степень поляризации ТГц излучения уменьшается. На рис.4 показаны спектры излучения при на-

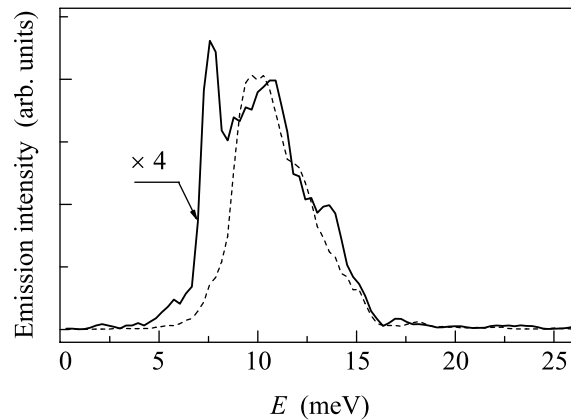


Рис.4. Спектры ТГц электролюминесценции одноосно деформированного p -Ge(Ga) при $E \sim 7$ В/см. $T = 5$ К. Спектральное разрешение ~ 0.6 мэВ. Сплошная кривая – спектр излучения, измеренный в геометрии $e \perp P$, пунктир – спектр, измеренный в геометрии $e \parallel P$

пряженности электрического поля ~ 7 В/см. Линия с максимумом при 7.56 мэВ остается преимущественно поляризованной перпендикулярно оси давления, но степень ее линейной поляризации падает до 20%. Уменьшение степени поляризации на данной линии можно объяснить возрастанием вклада оптических переходов $1\Gamma_4^- \rightarrow 1\Gamma_4^+$ из более высоко лежащего возбужденного состояния $1\Gamma_4^-$, но близкого по энергии к состоянию $1(\Gamma_5^- + \Gamma_6^-)$. Переход $1\Gamma_4^- \rightarrow 1\Gamma_4^+$ должен иметь место как в $e \parallel P$, так и в $e \perp P$ поляризации (см. например [8]), а заселенность состояния $1\Gamma_4^-$ будет возрастать при увеличении эффектив-

ной электронной температуры, которая растет с ростом напряженности электрического поля. Заметим, что особенности линейной поляризации излучения, а также изменение степени поляризации с ростом напряженности электрического поля свидетельствуют в пользу того, что состояния Γ_4^- лежат выше по энергии, чем состояния $(\Gamma_5^- + \Gamma_6^-)$, что отражено на рис.3. Последнее согласуется с расчетами [8], но несколько отличается от выводов работы [7], в которой вариационными методами было получено обратное чередование уровней энергии.

Поляризация излучения на широкой линии с максимумом при ~ 10 мЭВ также падает с ростом поля и составляет $\sim 60\%$ при $E \sim 7$ В/см (см. рис.3). В спектре ТГц излучения, соответствующем геометрии $\mathbf{e} \perp P$, видно появление дополнительной, широкой линии при ~ 13.5 мЭВ. Эти изменения спектров ТГц излучения, скорее всего, также обусловлены возрастанием влияния разогрева неравновесных дырок с ростом напряженности электрического поля. Детали этих процессов будут исследованы в дальнейшем.

Таким образом, измерены спектры ТГц электролюминесценции при пробое мелких акцепторов в одноосно деформированном германии в условиях вблизи порога пробоя примеси. Обнаружена линейная поляризация ТГц излучения. В спектре излучения выделены линии по разному поляризованные по отношению к оси давления и относящиеся к оптическим

переходам дырок между отдельными возбужденными состояниями и основным состоянием акцептора, а также к переходам дырок из валентной зоны на основное состояние примеси. Степень линейной поляризации достигает $\sim 93\%$ на основной линии излучения, наблюдаемого в геометрии $\mathbf{e} \perp P$.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 05-02-17770) и фонда МНТЦ (грант # 2206р), а также гранта Научная Школа (НШ-5920.2006.2).

1. M. A. Odnobludov, I. N. Yassievuch, M. S. Kagan et al., Phys. Rev. Lett. **83**, 644 (1999).
2. Yu. P. Gousev, I. V. Altukhov, E. G. Chirkova et al., Appl. Phys. Lett. **75**, 757 (1999).
3. S. H. Koenig and R. D. Brown, Phys. Rev. Lett. **4**, 170 (1960).
4. А. В. Андрианов, А. О. Захарьин, И. Н. Ясиевич и др., Письма в ЖЭТФ **79**, 448 (2004).
5. Н. Н. Зиновьев, А. В. Андрианов, В. Ю. Некрасов и др., ФТП **36**, 234 (2002).
6. Я. Е. Покровский, Н. А. Хвальковский, ФТП **39**, 197 (2005).
7. R. Buczko, IL Nouovo Cim. **9**, 669 (1987).
8. S. Rodriguez, P. Fisher, and F. Barra, Phys. Rev. B **5**, 2219 (1972).
9. P. Clauws, J. Broeckx, E. Rotsaert et al., Phys. Rev. B **38**, 12377 (1988).