

ВОЗДЕЙСТВИЕ ГОРЯЧИХ ЭЛЕКТРОНОВ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ GaAs

Ашкинадзе Б. М., Бельков В. В., Красинская А. Г.

Обнаружено плавное уменьшение интенсивности экситонной люминесценции в GaAs с ростом напряженности СВЧ поля. Для объяснения поведения интенсивности люминесценции при разогреве электронов рассмотрены уменьшение сечения образования экситонов с ростом электронной температуры, а также процессы ударной ионизации экситонно-примесных комплексов.

Введение. Низкотемпературная люминесценция достаточно чистых кристаллов GaAs определяется излучением свободных и связанных экситонов [1]. Вид спектра люминесценции зависит от параметров кристалла, а также внешних условий, например температуры, электрического и магнитного полей, и определяется механизмами образования и диссоциации экситонно-примесных комплексов (ЭПК) [1-4].

Эффективным методом исследования этих процессов является разогрев неравновесных электронов в электрическом поле, приводящий к значительным изменениям формы спектра и интенсивности люминесценции полупроводников. Этот метод позволяет исследовать процессы образования и ионизации экситонов, проводить идентификацию линий люминесценции и каналов рекомбинации неравновесных носителей, а также изучать транспортные свойства электронов при низких температурах [5-9].

В выполненных ранее работах [2, 3, 5-7] изучалось поведение интенсивности люминесценции различных полупроводников при увеличении напряженности постоянного электрического поля, и обычно оказывалось, что до некоторой величины поля интенсивность люминесценции не менялась, а затем начинался ее спад (или рост). Такой «пороговый» характер воздействия горячих электронов привел к представлению о том, что основным процессом, управляющим перераспределением между каналами рекомбинации неравновесных носителей, является ударная ионизация экситонов или примесей. Пороговая величина электрического поля, при достижении которой начинался спад люминесценции, использовалась для идентификации процесса ударной ионизации. При этом в одних работах считалось, что ударная ионизация связанных экситонов обусловлена отрывом экситона от примесного центра [3, 5, 6], в других же делался вывод об ударной ионизации только электрона, связанного на комплексе [1, 2]; некоторые авторы наблюдали рост интенсивности излучения свободных экситонов при ионизации связанных экситонов [8], а другие нет [2, 7].

В настоящей работе обнаружено, что гашение экситонной люминесценции при увеличении напряженности электрического поля в ряде случаев происходит монотонно и плавно. Показано, что это является следствием уменьшения сечения образования свободных экситонов с ростом энергии электронов; причем при увеличении времени жизни электронов или с ростом интенсивности света кривые гашения могут изменять вид и становиться «пороговыми». Приводившиеся до сих пор в литературе только пороговые зависимости, как мы покажем далее, иногда могут быть обусловлены неравномерным распределением постоянного электрического поля в образце. Ввиду этого для понимания механизма

гашения люминесценции и использования этого метода для изучения разогрева электронов более предпочтительно использовать бесконтактный разогрев электронов в микроволновом поле.

Проведенные в работе исследования влияния электронов, разогретых в СВЧ поле, на люминесценцию чистых кристаллов GaAs позволяют сделать вывод, что экситоны, связанные на мелких донорах и акцепторах, образуются и ионизируются путем присоединения (отрыва) свободного экситона к центру, в то время как экситоны, связанные на глубоком акцепторе, образуются путем последовательного захвата частиц.

Образцы и методика эксперимента

В экспериментах использовались образцы, изготовленные газофазной или жидкофазной эпитаксией на полуизолирующей подложке. Наиболее чистые образцы (Г13.1, Г89.6) имели концентрацию остаточных примесей около $5 \times 10^{12} \text{ см}^{-3}$ [4]. Для оценки подвижности электронов были проведены измерения циклотронного резонанса (ЦР) на фотовозбужденных электронах. В СВЧ поглощении наблюдалась узкая линия ЦР, отвечающая величине $\omega_{\tau} \sim 25$ при температуре 1.8 К. Рассчитанная по этим результатам подвижность составляла $3.0 \cdot 10^6 \text{ см}^2/\text{В} \cdot \text{с}$ [10]. Другие исследовавшиеся нами образцы содержали значительно больше примесей. Мы приведем результаты для одного из таких образцов (ФР170), концентрация примесей в котором $6.6 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Размеры исследовавшихся образцов составляли примерно $3 \times 5 \text{ мм}$, толщина эпитаксиального слоя — 20—40 мкм.

Возбуждение образцов, находившихся в жидком гелии ($T=1.8 \text{ К}$), производилось He—Ne-лазером с длиной волны 0.63 мкм. Разогрев электронов осуществлялся СВЧ полем. Образец помещался в короткозамкнутый отрезок волновода в пучность электрического поля. В качестве источника СВЧ использовался стабилизированный по частоте клистрон 8-миллиметрового диапазона с выходной мощностью $\sim 200 \text{ мВт}$. Уровень СВЧ мощности в волноводе плавно регулировался в широких пределах с помощью $p-i-n$ -диода. Волновод с образцом располагался вдоль оси сверхпроводящего соленоида, и при одновременном действии постоянного магнитного поля и СВЧ излучения могли реализовываться условия ЦР. Поверхность образца была расположена параллельно силовым линиям электрического поля. Излучаемый образцом свет фокусировался на щель монохроматора и регистрировался в режиме счета фотонов.

Результаты экспериментов и их обсуждение

На рис. 1, а представлены спектр люминесценции образца Г13.1 и его изменение при воздействии СВЧ поля. При малом уровне возбуждения ($J < 0.1 \text{ Вт/см}^2$) в экситонной области спектра присутствуют три пика, соответствующих рекомбинации свободных экситонов (X), экситонов, связанных на нейтральных (D^0, X) и понижованных (D^+, X) донорах. При воздействии СВЧ поля интенсивность излучения (I) всех линий уменьшается, причем в слабом СВЧ поле линии (X) и (D^+, X) гасятся одинаково, а линия (D^0, X) — сильнее (рис. 1, а, кривая 2). С увеличением СВЧ мощности гашение излучения комплекса (D^+, X) становится более эффективным, чем экситонов. Форма линии излучения как связанных, так и свободных экситонов при малой интенсивности светового возбуждения практически не меняется при увеличении СВЧ мощности до полного гашения люминесценции.

При высоком уровне светового возбуждения ($J > 1 \text{ Вт/см}^2$) также наблюдалось гашение экситонной люминесценции в СВЧ поле. Одновременно происходит уширение линии излучения свободного экситона. Изменения в спектре излучения свободных экситонов при разогреве электронов более ярко проявляются при температуре образца 4.2 К (рис. 1, б). Видно, что теперь в отсутствие СВЧ поля ($P=0$) в излучении проявляется верхняя поляритонная ветвь (ВПВ) [4], а разогрев электронов приводит к относительному росту заселенности ВПВ.

Изменения формы спектра излучения свободных экситонов мы связываем с ростом температуры экситонного газа в результате соударений экситонов

с горячими электронами. Как следует из экспериментов, разогрев экситонов происходит лишь при высоких уровнях возбуждения, причем при $T=1.8$ К он не приводит к существенному росту заселенности ВПВ, наблюдавшемуся при $T=4.2$ К. Отсюда можно сделать вывод, что электрон-экситонные соударения лишь изменяют функцию распределения экситонов по энергиям внутри поляритонных ветвей, а перераспределение экситонов между ветвями определяется экситон-фононным взаимодействием, которое при низких температурах неэффективно. Подобный неравновесный разогрев экситонного газа, при котором населенности двух экситонных подзон не соответствуют температуре экситонного газа, наблюдался ранее в кремнии [8].

На рис. 2, а (кривые 1—4) приведены зависимости интенсивности излучения свободных и связанных экситонов от величины СВЧ мощности при малом и большом уровнях светового возбуждения (образец Г13.1). Видно, что уменьшение интенсивности люминесценции начинается с малых уровней СВЧ мощности и происходит плавно; затем на кривых гашения для малых интенсивностей появляется перегиб, и крутизна гашения увеличивается. Заметим, что при высоких накачках спад интенсивности излучения с ростом СВЧ мощности происходит более плавно. Аналогичные беспороговые зависимости интенсивности экситонной люминесценции от величины СВЧ мощности наблюдались и во всех остальных исследованных образцах.

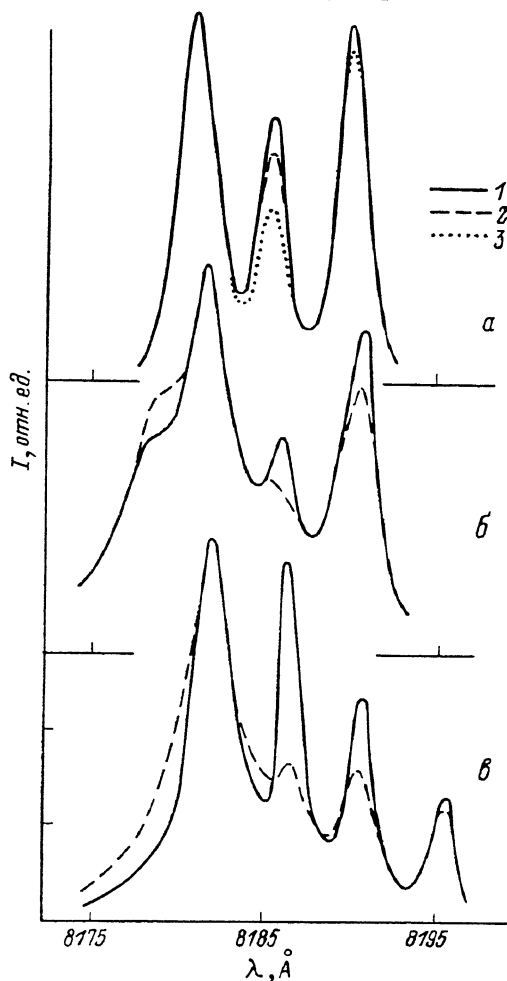


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции GaAs при разных уровнях СВЧ мощности (P).

Спектры нормированы на максимум интенсивности излучения (I_M). Значения P указаны в отн. ед., $P_M \sim 200$ МВт соответствует 300 отн. ед. а) Г13.1, $T=1.8$ К. P : 1 — 0, 2 — 1, 3 — 2.8 I_M : 1 — 600, 2 — 520, 3 — 300. б) Г13.1, $T=4.2$ К. P : 1 — 0, 2 — 6.5. I_M : 1 — 2100, 2 — 1200. в) Г89.6, $T=1.8$ К. P : 1 — 0, 2 — 150. I_M : 1 — 4200, 2 — 800.

На рис. 2, б приведены экспериментальные данные для образца ФР170. В спектре излучения этого образца доминировала линия (D^0, X). Широкие полосы с максимумами при $\lambda=8325$ и 8307 Å связаны с донорно-акцепторными переходами (D^0, A^0) и с переходами свободных электронов зоны проводимости на нейтральные акцепторы (e, A^0) соответственно [9, 11]. При воздействии СВЧ поля интенсивность (D^0, X)-люминесценции ведет себя так же, как и в чистых образцах, т. е. наблюдается плавное гашение. Однако характерное значение СВЧ мощности P' (например, приводящее к уменьшению интенсивности излучения в 2 раза), необходимое для гашения экситонной люминесценции, превышает соответствующее значение для кристалла Г13.1 приблизительно в 20 раз.

Это естественно связать со сравнительно низкой подвижностью электронов в образце ФР170. Действительно, в этом кристалле не наблюдался ЦР в СВЧ поглощении, т. е. величина подвижности не превышала величины 10^8 см²/В·с. Отметим, что корреляция величины подвижности электронов с характерным

значением СВЧ мощности P' имеет место и в образце Г13.1: при температуре 4.2 К наблюдался почти двухкратный рост необходимой для гашения излучения величины СВЧ мощности P' , в то время как подвижность электронов падала в 1.5 раза относительно ее значения при 1.8 К [10].

В отличие от экситонной люминесценции интенсивность излучения пар (D^0 , A^0) не менялась до тех пор, пока величина СВЧ мощности не превышала

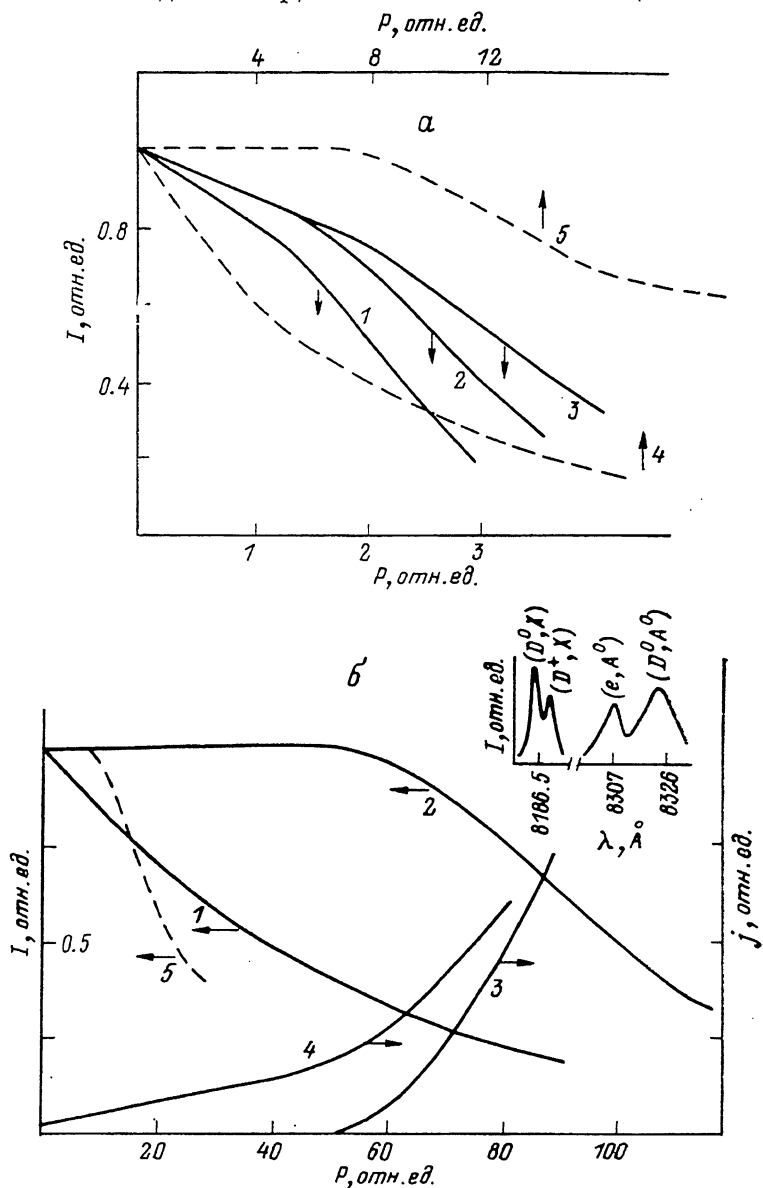


Рис. 2. Зависимости интенсивности люминесценции от СВЧ мощности.

$T=1.8$ К. а) Г13.1. $J=0.05$ Вт/см². 1 — (D^0 , X), 2 — (D^+ , X), 3 — (X). 4, 5 — излучение свободного и локализованного на глубоком центре экситонов соответственно. $J=1$ Вт/см². б) ФР-170. 1 — (D^0 , X), 2 — (D^0 , A^0), $J=0.5$ Вт/см². 3 ($J=0$), 4 ($J=0.5$ Вт/см²) — зависимости постоянного тока от СВЧ мощности. 5 — CdTe, (D^0 , X), $J=0.4$ Вт/см². На вставке — спектр образца ФР-170.

порогового значения (рис. 2, б). При дальнейшем увеличении СВЧ мощности происходило быстрое уменьшение интенсивности (D^0 , A^0)-люминесценции. Пороговое гашение люминесценции донорно-акцепторных пар естественно связывать с ударной ионизацией доноров горячими электронами.

Интенсивность линии (e , A^0) в СВЧ поле увеличивалась, а ее ширина росла. Поскольку форма линии (e , A^0) отражает распределение электронов по энергиям

в зоне проводимости, наблюдаемое уширение свидетельствует об увеличении средней энергии электронов, а возрастание интенсивности свидетельствует о росте концентрации электронов в зоне проводимости.

Разогрев электронов сопровождается генерацией значительного количества длинноволновых фононов. Оценки, подобные сделанным в [8], показывают, что число неравновесных фононов с энергией порядка энергии связи экситонов (которые могут вызывать ионизацию экситонных комплексов) мало по сравнению с концентрацией равновесных. Отметим, что ряд проведенных нами экспериментов показал отсутствие теплового нагрева образца при использованных величинах СВЧ мощности. Поскольку напряженность СВЧ поля не превышала 10 В/см, полевая ионизация экситонов тоже не имела места.

Таким образом, мы делаем вывод, что наблюдаемое плавное гашение экситонной люминесценции обусловлено разогревом электронов в СВЧ поле. Об этом же свидетельствует наличие резонансного гашения экситонной люминесценции при приближении к условиям циклотронного резонанса для элект-

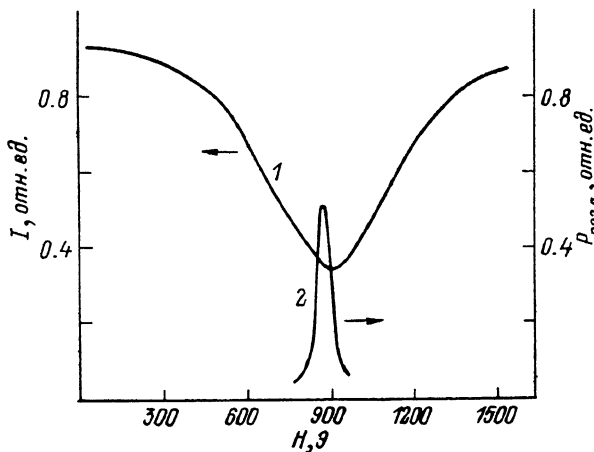


Рис. 3.

Рис. 1. $T=1.8$ К. 1 — гашение экситонной люминесценции в условиях ЦР; $J=0.5$ Вт/см², $P=2$. 2 — зависимость поглощения СВЧ мощности от величины магнитного поля; $P < 0.1$, $J=0.01$ Вт/см².

тронов (рис. 3). Наиболее эффективное влияние СВЧ поля наблюдается при величине магнитного поля $H_c = m^* \omega / e$, когда разогрев электронного газа максимален.

Обнаруженное нами беспороговое уменьшение интенсивности экситонной люминесценции в GaAs при увеличении СВЧ мощности существенно отличается от обычно наблюдаемых кривых гашения экситонной люминесценции в других полупроводниках. В кристаллах Ge [12], Si [8], а также в CdTe (как показано на рис. 2, б, кривая 5, для линии связанных экситонов) в аналогичных условиях зависимости $I(P)$ имеют другой вид: интенсивность люминесценции не меняется до некоторой величины P , а затем начинается ее спад. Если считать, как обычно, что температура электронов пропорциональна СВЧ мощности, то такие «пороговые» зависимости, естественно, объясняются моделью ударной ионизации экситонного комплекса электронами, разогретыми до $kT_e \sim E_s$ [6, 13].

Плавная зависимость интенсивности излучения экситонов от температуры электронов является необычной. Такого рода зависимость нельзя связывать только с ударной ионизацией экситонов. Покажем, что для объяснения гашения экситонной люминесценции при разогреве электронов необходимо учитывать наряду с ударной ионизацией уменьшение сечения связывания электрона и дырки в экситон с ростом энергии свободных носителей, причем проявление этого фактора зависит от соотношения скорости рекомбинации электронов и темпа связывания в экситоны.

Кинетические уравнения для электронов и экситонов выглядят следующим образом:

$$\frac{dn_e}{dt} = G - \frac{n_e}{\tau_e} - \alpha n_e^2 + \gamma_i n_e n_x, \quad (1)$$

$$\frac{dn_x}{dt} = \alpha n_e^2 - \frac{n_x}{\tau_x} - \gamma_i n_e n_x, \quad (2)$$

где G — темп генерации, γ_i — коэффициент ударной ионизации, n_e и n_x — концентрации электронов и экситонов, τ_e и τ_x — времена жизни электронов и экситонов, α — коэффициент связывания в экситон.

Зависимость сечения связывания в экситоны от температуры электронов теоретически не рассматривалась. Однако в [14] было рассчитано сечение захвата горячих электронов на кулоновский водородоподобный центр. Для случая слабых электрических полей (в которых несущественно изменение кулоновского потенциала) было показано, что $\alpha \sim T_e^{-3/2}$. Мы полагаем, что для сечения связывания в экситоны должна быть справедлива подобная зависимость. Коэффициент ударной ионизации при максвелловском распределении по скоростям носителей может быть записан в следующем виде:

$$\gamma_i = \pi a_B^2 \frac{2kT_e^{1/2}}{m^*} \exp\left(\frac{-E_i}{kT_e}\right) = \gamma_0 \exp\left(\frac{-E_i}{kT_e}\right).$$

Из уравнений (1) и (2) в стационарном случае можно получить зависимости концентрации электронов и экситонов от электронной температуры. На рис. 4 показаны зависимости n_x от температуры электронов в двух следующих случаях.

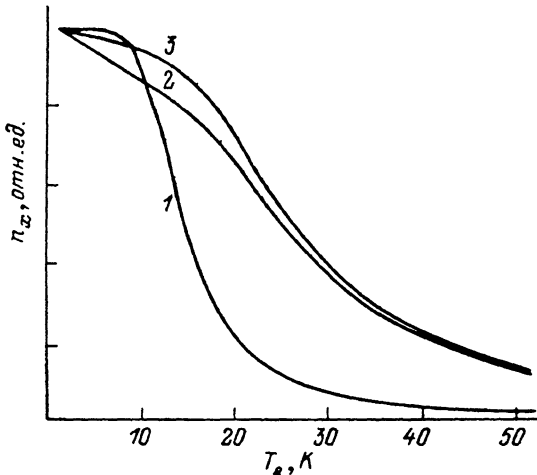


Рис. 4. Расчетные зависимости концентрации экситонов от электронной температуры.

1 — $\tau_e = 1$ мкс, $\tau_x = 5$ нс; 2 — $\tau_e = 100$ нс, $\tau_x = 5$ нс; 3 — $\tau_e = 100$ нс, $\tau_x = 5$ нс. $G, \text{см}^3/\text{с}$: 1, 2 — $5 \cdot 10^{20}$, 3 — $5 \cdot 10^{21}$.

1) $\alpha n_e \tau_e > 1$; такое соотношение характерно для чистых кристаллов Ge и Si [12]. Для значений $\alpha = 2.2 \cdot 10^{-4} T_e^{-3/2} \text{см}^3/\text{с}$, $\gamma_0 = 6 \cdot 10^{-5} \text{см}^3/\text{с}$, $\tau_e = 1$ мкс, $\tau_x = 5$ нс и энергии ионизации экситонов 4.1 мэВ (Ge) получим кривую 1. Видно, что в этом случае интенсивность люминесценции «обычным образом» зависит от температуры электронов [6, 7, 12].

2) В прямозонном полупроводнике GaAs времена жизни электронов и экситонов существенно меньше, и при невысоких накачках $\alpha n_e \tau_e < 1$. Кривые, полученные при $\alpha = 2.2 \cdot 10^{-4} T_e^{-3/2} \text{см}^3/\text{с}$, $\gamma_0 = 2 \cdot 10^{-4} \text{см}^3/\text{с}$, $\tau_e = 100$ нс, $\tau_x = 5$ нс и $E_i = 4.6$ мэВ для уровня низкого и высокого возбуждений, приведены на рис. 4 (кривые 2).

3) Видно, что теперь зависимости имеют другой характер. Концентрация экситонов спадает на начальном участке из-за уменьшения сечения связывания при повышении температуры электронов. Более резкий ход кривой при $T_e > 15$ К связан с началом ударной ионизации экситонов. Отметим, что если полагать γ_0 меньше, чем $10^{-4} \text{см}^3/\text{с}$, то при малых уровнях возбуждения роль ударной ионизации в зависимости $n_x(T_e)$ не проявится.

Причины зависимости вида кривой гашения от величины $\alpha n_e \tau_e$ можно пояснить следующим образом. При слабом разогреве электронов (когда вклад ударной ионизации мал) существуют два канала ухода фотовозбужденных электронов из зоны проводимости: связывание в экситоны и рекомбинация электронов. Если доминирует первый канал, т. е. $\alpha n_e \tau_e > 1$ (это случай большого времени жизни или высокой накачки), то концентрация экситонов слабо зависит от сечения связывания; разогрев электронов значительно изменяет концентрацию экситонов, лишь когда начинается их ударная ионизация. Если основным механизмом гибели фотовозбужденных электронов является их рекомбинация, то концентрация экситонов пропорциональна сечению их образования и, следовательно, зависит от температуры как $T_e^{-1/2}$.

Таким образом, имеется качественное согласие расчетных $n_e(T_e)$ и экспериментальных зависимостей $I(P)$. Отсюда следует, что начальный спад интенсивности люминесценции происходит из-за уменьшения сечения связывания в свободные экситоны. Комплекс (D^0, X) имеет самую малую энергию ионизации (1.2 мэВ), ударная ионизация этих комплексов начинается в очень малых полях, поэтому кривая гашения комплекса (D^0, X) идет более резко, чем для свободных экситонов и комплексов (D^+, X) . При увеличении СВЧ поля становится возможной ударная ионизация (D^+, X) ($E_i = 2.8$ мэВ), интенсивность излучения этих комплексов начинает уменьшаться сильнее, чем свободных экситонов, и в зависимости $I(P)$ появляется перегиб. При дальнейшем увеличении СВЧ поля происходит ударная ионизация свободных экситонов.

Нами также изучалось гашение излучения экситонов, связанных на мелких акцепторах (измерения проводились на образце Г89.6, отличающемся от Г13.1 более высокой степенью компенсации). В широком диапазоне изменения СВЧ мощности интенсивность излучения комплекса (A^0, X) уменьшалась пропорционально интенсивности люминесценции свободных экситонов (рис. 1, в). Отметим, что для диссоциации комплекса (A^0, X) с образованием свободного экситона необходима энергия ~ 3.4 мэВ и соответственно требуется более сильный разогрев электронного газа, чем для ударной ионизации комплекса (D^+, X) .

Характер гашения излучения мелких ЭПК, а именно совпадение начальных участков на кривых $I(P)$ с поведением интенсивности свободных экситонов, позволяет сделать вывод, что образование этих комплексов происходит как захват экситона на примесный центр. С другой стороны, поскольку ионизация мелких ЭПК наблюдается при заметно меньших уровнях СВЧ мощности, чем при примесном пробое,¹ можно полагать, что в результате соударения горячего электрона с ЭПК происходит отрыв экситона как целого. В силу этих же причин наши результаты свидетельствуют о том, что линию излучения с максимумом при 8187 Å не следует связывать с переходом (D^0, h) [1, 2].

Рассмотрим теперь влияние горячих электронов на люминесценцию экситонов, локализованных на глубоком примесном центре — кислороде. Рекомбинация этого ЭПК отвечает узкая линия ($\lambda = 8327$ Å) [15] в спектре люминесценции образца Г13.1. Излучение этого комплекса гасится существенно медленнее, чем люминесценция свободных экситонов, и существует в условиях, когда последние почти полностью ионизованы (рис. 2, а, кривые 4, 5). Это означает, по-видимому, что экситоны на глубоком центре образуются в результате последовательного захвата электрона и дырки.

Обсудим теперь характер гашения экситонной люминесценции при высоком уровне возбуждения. Как следует из расчета (рис. 4), с ростом накачки начальный участок зависимости $I(P)$ должен выполаживаться, а перегиб проявляться более отчетливо. Эти изменения вызваны ростом величины $\alpha n_e \tau_e$. Однако экспериментальная зависимость $I(P)$ при высоком уровне возбуждения оказалась плавной, не имеющей перегиба кривой (рис. 2, а, кривая 4). Причины такого различия могут состоять, на наш взгляд, в следующем.

¹ Началу примесного пробоя соответствует порог в зависимости величины постоянного тока через кристалл от уровня СВЧ мощности $j(\bar{P})$ (рис. 2, б, кривая 3), эта зависимость получена при приложении к образцу пробного напряжения $U = 10$ мВ.

1) С ростом интенсивности возбуждения в кристаллах GaAs происходит разогрев электронов светом [11], и уже в отсутствие СВЧ поля энергия электронов может оказаться достаточной для ударной ионизации экситонов.

2) К сглаживанию зависимости $n_x(P)$ ведет также наблюдавшееся при возрастании уровня возбуждения уменьшение времени жизни электронов [11].

3) С ростом накачки уменьшается подвижность электронов (об этом свидетельствуют измерения ЦР при различных уровнях возбуждения) [10], и, следовательно, для достижения тех же величин электронной температуры требуются большие уровни СВЧ мощности.

Гашение люминесценции при разогреве электронов в постоянном поле

Изучая влияние постоянного электрического поля на люминесценцию кристаллов GaAs, авторы [2] получили зависимости $I(U)$, заметно отличные от наших (рис. 2). Мы провели сравнительное изучение влияния постоянного и СВЧ электрических полей на интенсивность излучения GaAs. В этих экспериментах использовался образец ФР170, на который были нанесены контакты, расстояние между контактами составляло 3 мм, диаметр светового пятна превышал этот размер.

На рис. 5 показаны зависимости интенсивностей линий 8187 (D^0, X) и 8325 Å (D^0, A^0) от величины приложенного напряжения (U); здесь же приведены вольт-амперные характеристики кристалла в темноте и на свету. В отличие от случая СВЧ поля (рис. 2, б) гашение излучения экситонов и пар (D^0, A^0) в постоянном поле происходит подобным образом и начинается вблизи напряжения U_0 , соответствующего порогу примесного пробоя.

При действии же СВЧ поля к мо-

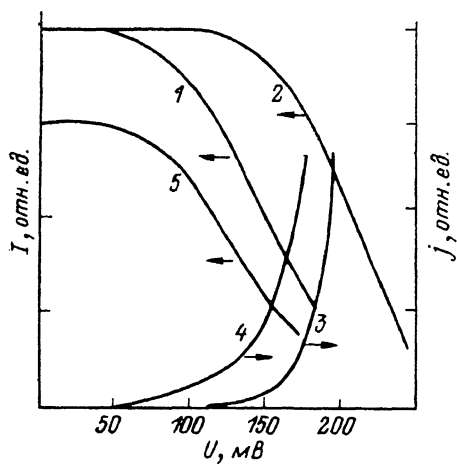


Рис. 5. Зависимость интенсивности излучения от величины приложенного к образцу напряжения. Образец ФР-170, $T=1.8$ К.

1, 5 — (D^0, X) для $P=0$ и $P > 0$ соответственно; 2 — (D^0, A^0), $P=0$; 3, 4 — ВАХ для $J=0$ и $J=0.5$ Вт/см².

менту начала примесного СВЧ пробоя (рис. 2, б, кривая 3) экситонная люминесценция уже практически полностью погашена, а излучение пар (D^0, A^0) только начинает уменьшаться.

Причиной такого различия является, на наш взгляд, неоднородность распределения постоянного электрического поля, что связано как с трудностью изготовления низкотемпературных контактов к высокоомным образцам, так и возможной неоднородностью засветки образца. Поэтому при малых напряжениях поле в основном локализовано вблизи контактов и мало в освещенной области. С ростом напряжения в высокоомной области происходит примесный пробой, что приводит к перераспределению поля, и начинается гашение экситонной и (D^0, A^0)-люминесценции.

Слабое проникновение постоянного поля при малых значениях U в освещенную область кристалла отчетливо проявляется при совместном действии СВЧ и постоянного полей (рис. 5, кривые 1, 5). СВЧ поле приводит к тому, что уже при $U=0$ температура электронов высока, и наблюдается гашение экситонной люминесценции. При увеличении постоянного напряжения дальнейший спад излучения происходит лишь при достижении порогового значения U вблизи начала примесного пробоя.

Неоднородным распределением поля, по-видимому, объясняются как ре-

зультаты работы [5], так и наблюдавшаяся в работе [16] пороговая зависимость электронной температуры от напряжения, приложенного к образцу.

Таким образом, неоднородное распределение постоянного электрического поля и его перераспределение с ростом напряжения на образце не дает возможности использовать экспериментальную зависимость интенсивности излучения от величины приложенного напряжения для корректного анализа механизмов ионизации экситонных комплексов.

Выводы. В настоящей работе обнаружена зависимость величины сечения связывания носителей в экситоны от электронной температуры. Характер гашения экситонной люминесценции в электрическом поле свидетельствует о том, что образование мелких ЭПК происходит путем захвата экситона на примесь как целого, глубокий ЭПК образуется в результате последовательного захвата электрона и дырки. Показано, что величина подвижности электронов определяет скорость уменьшения интенсивности экситонной люминесценции с ростом СВЧ мощности.

Авторы признательны В. В. Россину за предоставление чистых образцов арсенида галлия.

Список литературы

- [1] Bogardus E. H., Bebb H. B. // Phys. Rev. 1968. V. 176. N 3. P. 993—1002.
- [2] Bludaw W., Wagner E. // Phys. Rev. B. 1976. V. 13. N 12. P. 5410—5414.
- [3] Yamawaki M., Hamaguchi C. // Phys. St. Sol. (b). V. 112. N 1. P. 201—210.
- [4] Жилиев Ю. В., Маркарян Г. Р., Россин В. В., Россина Т. В., Травников В. В. // ФТТ. 1986. Т. 28. В. 9. С. 2688—2695.
- [5] Skromme B. J., Stillman G. E. // Phys. Rev. B. 1983. V. 28. N 8. P. 4602—4607.
- [6] Ашкинадзе Б. М., Рывкин С. М., Ярошецкий И. Д. // ФТП. 1969. Т. 3. В. 4. С. 535—540.
- [7] Weman H., Zhao Q. X., Monemar B. // Sol. St. Electron. 1988. V. 31. N 4. P. 791—794.
- [8] Ашкинадзе Б. М., Бельков В. В. // ФТТ. 1988. Т. 39. В. 4. С. 1084—1088.
- [9] Romestein R., Weisbuch C. // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. N 25. P. 2067—2070.
- [10] Ашкинадзе Б. М., Бельков В. В., Красинская А. Г. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 3. С. 572—574.
- [11] Ulbrich R. G. // Phys. Rev. B. 1973. V. 8. N 12. P. 5719—5727.
- [12] Ашкинадзе Б. М., Фишман И. М. // ЖЭТФ. 1980. Т. 78. В. 5. С. 1793—1810.
- [13] Smith D. L., Pan D. S., McGill T. C. // Phys. Rev. B. 1976. V. 12. N 10. P. 4360—4367.
- [14] Абакумов В. Н., Крешук И. Н., Ясиевич И. Н. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 2. С. 264—272.
- [15] Ashen D. J., Dean P. J., Hurlle D. T. J., Mullin J. B., White A. M., Greene P. D. // J. Phys. Chem. Sol. 1975. V. 36. N 10. P. 1041—1053.
- [16] Bludaw W., Wagner E., Queisser H. J. // Sol. St. Commun. 1976. V. 18. N 7. P. 861—864.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получена 24.10.1989
Принята к печати 8.01.1990