

## Спектр стимулированного излучения, возникающего при межзонном поглощении пикосекундного импульса света в тонком слое GaAs

© И.Л. Броневой, А.Н. Кривоносов

Институт радиотехники и электроники Российской академии наук,  
103907 Москва, Россия

(Получена 1 октября 1997 г. Принята к печати 10 октября 1997 г.)

Экспериментально получено представление об изменениях интегрального по времени спектра мощного нестационарного краевого излучения в тонком слое GaAs при изменениях диаметра луча и энергии мощного пикосекундного импульса оптической накачки GaAs. Это дало необходимое подтверждение стимулированной природы такого излучения, длительность которого находится в пикосекундном диапазоне времен.

Известно (см., например, [1–4]), что при межзонном поглощении мощного сверхкороткого импульса света в тонком слое прямозонного полупроводника аномально быстро (за пикосекундные времена) возникает мощное рекомбинационное краевое излучение (далее называемое просто излучением). Через время  $\sim 10$  пс после окончания возбуждающего импульса излучение затухает, т. е. длительность импульса излучения находится в пикосекундном диапазоне времен. Предполагалось, что это излучение — стимулированное, возникающее в результате усиления спонтанного излучения в фотовозбужденном полупроводнике. Это предположение основывалось на следующих признаках. Во-первых, характерное время релаксации излучения существенно меньше времени релаксации спонтанного излучения в GaAs, составляющего  $\sim 1$  нс. Во-вторых, излучение начинает наблюдаться, когда концентрация носителей заряда становится выше пороговой, а именно, когда  $\mu_e - \mu_h > E_g$ , [3] и в фотовозбуждаемой среде возникает спектр усиления света, наблюдавшийся, например, в [5,6] (здесь  $\mu_e$  и  $\mu_h$  — квазиуровни Ферми электронов и дырок,  $E_g$  — ширина запрещенной зоны).

Надо признать, что приведенные экспериментальные данные об излучении явно недостаточны. Получить точное представление о характеристиках излучения априори нельзя из-за отсутствия теории, описывающей зависимость такого нестационарного (в пикосекундном диапазоне времен) стимулированного излучения в тонком слое полупроводника без резонатора от параметров мощного сверхкороткого импульса оптической накачки. В такой теории должны быть учтены: нестационарность оптической накачки; существенный разогрев генерирующей излучение электронно-дырочной плазмы (ЭДП), создаваемый возбуждающим светом и самим излучением [7–11]; сильная взаимная связь между процессом охлаждения ЭДП и интенсивностью излучения [9,11]; нестационарное и неоднородное пространственное распределение ЭДП [11] и т.д. При такой ситуации мы продолжили в настоящей работе экспериментальное исследование, чтобы получить представление о влиянии на излучение диаметра луча  $F$  и плотности энергии  $D_{ex}$  возбуждающего импульса (называемого также импульсом накачки). Длительность импульса — 14 пс. Поясним, что при изменении плотности энергии  $D_{ex}$  должны изменяться

скорость фотогенерации носителей заряда и инверсная заселенность состояний, а при изменении диаметра луча  $F$  должен изменяться диаметр активной области среды, усиливающей свет. Измеренные зависимости плотности энергии излучения от диаметра  $F$  и плотности энергии возбуждения  $D_{ex}$  не содержали в себе достаточно убедительного доказательства стимулированной природы излучения. Такое доказательство дало исследование спектра излучения. Было наблюден одно из наиболее характерных свойств стимулированного излучения в полупроводнике (см., например, [12–15]) — сужение спектра излучения при усилении оптической накачки. Сужение спектра излучения происходит в процессе усиления спонтанного излучения в полупроводнике. Мы измерили спектры излучения при различных значениях плотности энергии  $D_{ex}$  возбуждающего импульса света и диаметра луча  $F$ . Поведение измеренных спектров качественно соответствовало изменениям спектров стационарного стимулированного излучения, которые следуют из теории стационарного стимулированного излучения в лазерной среде без резонатора [16] и из результатов модельных расчетов стационарного стимулированного излучения в GaAs-лазере [17]. Это относится к следующим экспериментальным фактам: 1) уменьшение ширины спектра излучения, достигающее насыщения, при увеличении плотности энергии  $D_{ex}$  возбуждающего импульса и при увеличении диаметра  $F$ ; 2) универсальный характер уменьшения ширины спектра излучения  $\Delta\hbar\omega_s$  как функции произведения  $D_{ex}F$ ; 3) концентрация спектра излучения в более длинноволновой области при увеличении плотности энергии  $D_{ex}$  или диаметра  $F$ . Подчеркнем, что наблюдавшееся сужение спектра излучения и концентрация его в более длинноволновой области при увеличении плотности энергии возбуждающего импульса противоположно тому, что происходило бы, если бы излучение было спонтанным. Спектр спонтанного излучения, согласно [18], становится шире и распространяется в коротковолновую область при усилении накачки полупроводника.

Немногочисленность экспериментальных работ по исследованию излучения, возникающего при оптической накачке полупроводника без резонатора сверхкороткими импульсами, связана, по-видимому, со следующими обстоятельствами. Во-первых, для возбуждения излучения

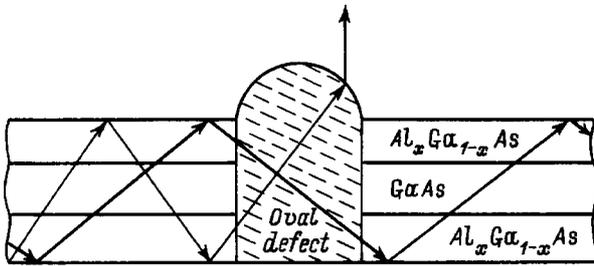


Рис. 1. Предполагаемая схема выхода излучения (показано стрелками) из образца наружу.

требуются источники сверхкоротких импульсов света высокой мощности. Желательно, чтобы энергия фотона возбуждающего света  $\hbar\omega_{ex}$  лишь несколько превышала ширину запрещенной зоны  $E_g$ . Тогда температура  $T_c$  генерируемой электронно-дырочной плазмы не слишком превышает температуру кристаллической решетки (например, в работе [3]  $T_c \approx 470$  К). Это ускоряет появление излучения. Во-вторых, необходимо найти способ вывода излучения из слоя полупроводника наружу. Эпитаксиальные слои полупроводников являются волноводами. Если слой полупроводника изготовлен идеально, то выход наружу существенно усиленного спонтанного излучения возможен лишь в продольном направлении, но еще до выхода наружу в этом направлении излучение поглощается в невозбужденной области образца. Это особенно относится к опытам при комнатной температуре, как показано в [1]. К тому же, если излучение и достигало бы торцов образца, то влияло бы отражение излучения от торцов. В настоящей работе мы выявили характерные признаки спектров стимулированного излучения, исследуя излучение, выходящее ортогонально эпитаксиальному слою, хотя часто считают, что в этом направлении распространяется лишь спонтанное, практически не усиленное излучение. Из реально видимых причин выхода излучения в направлении, ортогональном слою, пока можно назвать лишь несовершенство морфологии поверхности гетероструктуры, в состав которой входит исследуемый слой GaAs (гетероструктура описана далее). Несовершенство морфологии создают так называемые овальные дефекты. Они являются специфическим типом дефектов при молекулярно-лучевой эпитаксии — методе, которым выращена гетероструктура. Размеры овальных дефектов составляют  $2 \div 100$  мкм<sup>2</sup> (см. [19]). Эти дефекты достаточно однородно распределены по образцу (в масштабе возбуждаемой площади образца). На рис. 1 упрощенно показано, как может происходить выход излучения наружу.

Опыты проводились при комнатной температуре  $T_R$ . Исследовавшийся образец представлял собой гетероструктуру  $Al_{0.22}Ga_{0.78}As$ – $GaAs$ – $Al_{0.4}Ga_{0.6}As$ , с толщинами слоев 1.3–1.5–1.2 мкм, выращенную на подложке из GaAs (100). Концентрация фоновых примесей в гетероструктуре была  $< 10^{15}$  см<sup>-3</sup>. На площади  $4 \times 4$  мм<sup>2</sup> подложку стравливали. Слои  $Al_xGa_{1-x}As$ , предназначенные

для стабилизации поверхностной рекомбинации и механической прочности, прозрачны для света с  $\hbar\omega < 1.7$  эВ, используемого в эксперименте. Образец облучали мощным импульсом света длительностью 14 пс, падавшего на образец под углом  $\sim 10^\circ$  относительно нормали к его поверхности. Энергия фотона возбуждающего света  $\hbar\omega_{ex} = 1.485$  эВ превышала ширину запрещенной зоны GaAs на 60 мэВ. Межзонное поглощение возбуждающего света происходило только в слое GaAs. Изменение интенсивности света по сечению возбуждающего луча было приблизительно гауссовым. Опыты проводились при различных значениях энергии светового импульса и диаметра луча  $F$ . По методике, описанной в [20], были измерены спектры краевого излучения (интегральные по времени), распространяющегося внутри телесного угла  $\sim 4^\circ$ . Ось угла совпадала с нормалью к эпитаксиальным слоям, проведенной из возбуждаемой области. Для удобства анализа результатов измерений рассчитывались плотности энергии возбуждающего импульса света  $D_{ex}$  и плотности энергии импульса излучения: спектральная  $d_s$  и интегральная по спектру  $D_s$ . Это делалось на основании измерений соответствующих энергий, интегральных по времени, и диаметра возбуждающего луча (на полувысоте). Соответственно, значения  $D_{ex}$ ,  $d_s$  и  $D_s$  являются интегральными по времени и средними по сечению фотовозбуждаемой области образца.

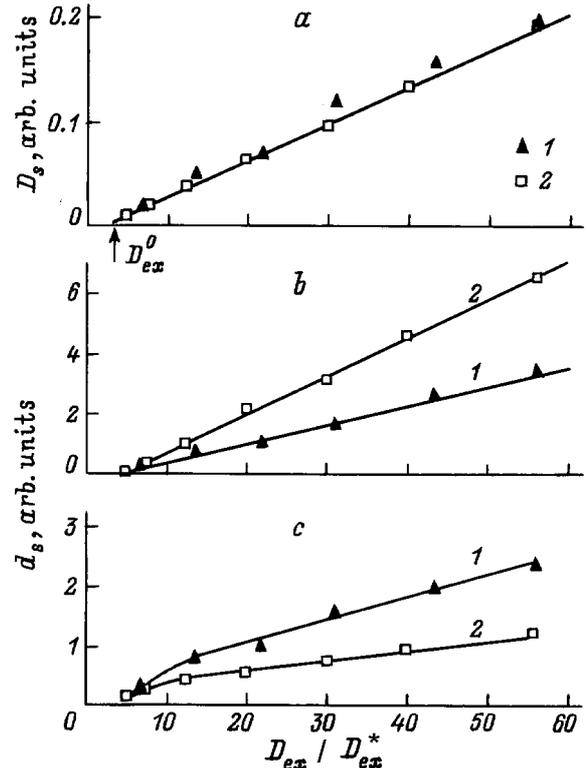


Рис. 2. Зависимости плотности интегральной по спектру энергии излучения  $D_s$  (a), плотности энергии излучения  $d_s$  при  $\hbar\omega_s = 1.39$  эВ (b) и  $\hbar\omega_s = 1.42$  эВ (c) от плотности энергии возбуждающего импульса  $D_{ex}$ .  $\hbar\omega_{ex} = 1.485$  эВ,  $F$ , мм: 1 — 0.2, 2 — 0.7.  $D_{ex}^*$  — нормировочная величина.

Перемещение носителей заряда по образцу во время излучения в расчет не принималось. Это допустимо по отношению к диффузии носителей заряда, длина которой по оценкам существенно меньше  $F$ . Надо ли учитывать перераспределение ЭДП по образцу, связанное с генерацией ЭДП при межзонном поглощении самого излучения в слое GaAs, пока не ясно. Расчеты [11] такого перераспределения ЭДП выполнены пока только для одномерного случая.

На рис. 2, *a* представлена экспериментальная зависимость плотности энергии излучения  $D_s$  от плотности энергии возбуждающего импульса  $D_{ex}$ . Экспериментальные результаты хорошо аппроксимируются линейной зависимостью, которая пересекает ось  $D_{ex}$  при некотором значении  $D_{ex}^0$ . Величину  $D_{ex}^0$  нередко называют пороговой, и более подробно она обсуждается в работах [2,4]. Возникающее в указанном смысле пороговым образом, линейное возрастание энергии излучения при усилении накачки характерно для стимулированного излучения. Аналогичные линейные зависимости наблюдались при исследовании стимулированного излучения при разных методах накачки, например, в слое GaInAsP [4], в суперлюминесцентном диоде из арсенида галлия [14], в лазере на двойной гетероструктуре  $Al_xGa_{1-x}As/GaAs$  [21]. Отметим, что при увеличении  $D_{ex}$  за пределы показанного на рис. 2, *a* диапазона (из-за ограничения энергии возбуждающего импульса это было сделано только для  $F = 0.2$  мкм) зависимость  $D_s(D_{ex})$  обнаруживала тенденцию к насыщению.

Как видно из рис. 2, *a*, при изменении диаметра  $F$  от 0.7 до 0.2 мм зависимость  $D_s(D_{ex})$  практически не изменялась. Параметры  $D_{ex}$  и  $F$ , безусловно, должны влиять на стимулированное излучение. Однако интегральная зависимость  $D_s(D_{ex}, F)$ , измеряемая при оптической накачке сверхкороткими импульсами, мало пригодна для выявления характерных для стимулированного излучения процессов. Это связано с тем, что плотность энергии излучения  $D_s$  определяется интегральным количеством электронно-дырочных пар, сфотогенерированных во время возбуждающего импульса, а затем излучательно рекомбинировавших, т. е. плотность энергии импульса излучения определяется в значительной степени межзонным поглощением возбуждающего импульса света, генерирующего ЭДП.

Можно отметить, что при изменении диаметра  $F$  наблюдалось изменение зависимости плотности энергии излучения (при фиксированной энергии фотона)  $d_s$  от плотности энергии возбуждения  $D_{ex}$  (см. рис. 2, *b, c*). Это, по-видимому, является уже проявлением стимулированной природы излучения и связано с изменением размера усиливающей излучение активной среды. Однако анализ таких зависимостей (измерявшихся также в [2]) затрудняется упоминавшимся отсутствием теории исследуемого излучения. Более ясно стимулированная природа излучения проявляется в изменениях спектра излучения при изменении диаметра луча  $F$  и плотности энергии возбуждающего импульса  $D_{ex}$ . Этому посвящена остальная часть настоящей работы.

Характерный вид наблюдавшихся спектров излучения иллюстрирует рис. 3. При минимальной использованной плотности энергии возбуждения  $D_{ex}$  наблюдались спектры, подобные спектру рис. 3, *b* для  $F = 0.2$  мм и характерные еще для спонтанного излучения. На это указывает следующие факты. Во-первых, максимум в спектре плотности  $d_s$  энергии краевого излучения располагается при энергии фотона  $\hbar\omega_s^m \simeq E_g^0$ , где  $E_g^0$  — ширина запрещенной зоны "невозбужденного" образца (см. рис. 4). Во-вторых, ширина спектра излучения (на полувысоте)  $\Delta\hbar\omega_s$  даже несколько превышает значение  $1.8kT_R$  (см. рис. 5), характерное для спонтанной люминесценции при комнатной температуре [22]; большая чем  $1.8kT_R$  ширина спектра объясняется уширением спектра спонтанного излучения с ростом температуры ЭДП  $T_c$ , а температура  $T_c$  в наших опытах должна превышать  $T_R$ , так как кинети-

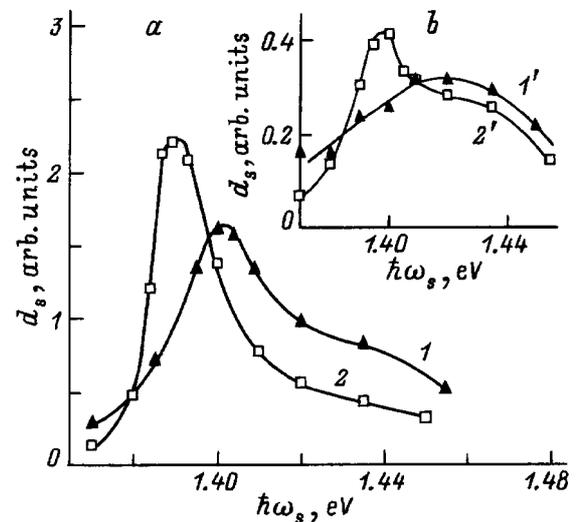


Рис. 3. Спектры плотности энергии излучения  $d_s$  из GaAs при  $\hbar\omega_{ex} = 1.485$  эВ. *a*: 1 —  $D_{ex} = 22 D_{ex}^*$ ,  $F = 0.2$  мм; 2 —  $D_{ex} = 20 D_{ex}^*$ ,  $F = 0.7$  мм. *b*: 1' —  $D_{ex} = 6.8 D_{ex}^*$ ,  $F = 0.2$  мм; 2' —  $D_{ex} = 7.5 D_{ex}^*$ ,  $F = 0.7$  мм.  $D_{ex}^*$  — нормировочная величина.

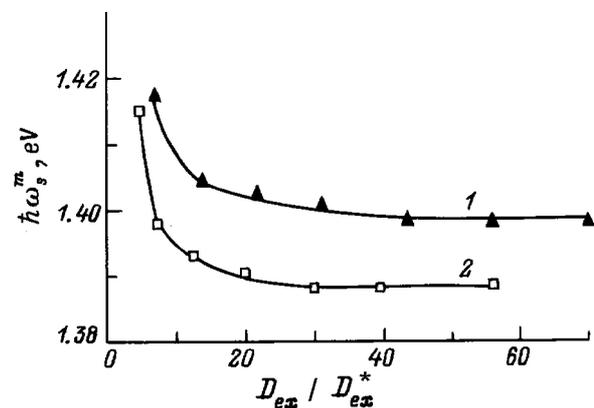
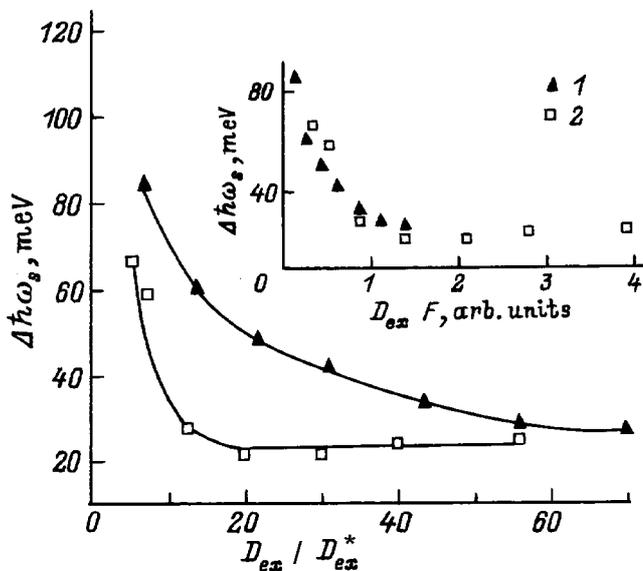


Рис. 4. Зависимость энергии фотона  $\hbar\omega_s^m$ , соответствующей максимуму спектра излучения, от  $D_{ex}$  при  $\hbar\omega_{ex} = 1.485$  эВ.  $F$ , мм: 1 — 0.2, 2 — 0.7.  $D_{ex}^*$  — нормировочная величина.



**Рис. 5.** Зависимости ширины спектра излучения  $\Delta\hbar\omega_s$  от  $D_{ex}$  при  $\hbar\omega_{ex} = 1.485$  эВ.  $F$ , мм: 1 — 0,2, 2 — 0,7. На вставке — соответствующие зависимости  $\Delta\hbar\omega_s$  от  $D_{ex}F$ .  $D_{ex}^*$  — нормировочная величина.

ческая энергия фотогенерируемой электронно-дырочной пары, равная  $\hbar\omega_{ex} - E_g$ , превышала  $kT_R$ .

При увеличении плотности энергии возбуждения  $D_{ex}$  наблюдалось уменьшение ширины спектра излучения  $\Delta\hbar\omega_s$  (см. рис. 5). По мере увеличения  $D_{ex}$  уменьшение  $\Delta\hbar\omega_s$  замедляется и стремится к насыщению. Обнаруженное уменьшение ширины спектра является, как уже говорилось, доказательством стимулированной природы излучения. При спонтанном излучении ширина спектра излучения, наоборот, должна была бы возрастать с усилением накачки согласно [18].

При изменении  $F$ , характеризующего диаметр активной области, зависимость ширины спектра излучения от плотности энергии возбуждения  $D_{ex}$  изменялась (см. рис. 5). При большем диаметре  $F = 0.7$  мм уменьшение ширины спектра  $\Delta\hbar\omega_s$  при увеличении  $D_{ex}$  происходило существенно быстрее, и насыщение зависимости  $\Delta\hbar\omega_s = f(D_{ex})$  наступало при меньшем  $D_{ex}$ , чем в случае  $F = 0.2$  мм. Однако изменение  $F$  не влияло на значение  $\Delta\hbar\omega_s$ , при котором зависимость  $\Delta\hbar\omega_s = f(D_{ex})$  насыщалась. Последнее показали измерения при дальнейшем увеличении  $D_{ex}$  за пределы диапазона, представленного на рис. 5. Можно отметить, что при насыщении величина  $\Delta\hbar\omega_s$  для разных образцов возрастала по мере увеличения дефектности кристаллической структуры образца (исследованный в этой работе образец был лучшим из имевшихся). Степень дефектности оценивалась рентгеновской дифрактометрией.

Воспользуемся теорией [16], которая посвящена стационарному стимулированному излучению в лазерной среде без резонатора и экстаполирует свои выводы о сужении спектра излучения также на GaAs. Эта теория учитывает пространственную неоднородность усиления

излучения, но не учитывает конкретные особенности полупроводника. Согласно [16], спектр стимулированного излучения должен сужаться при увеличении энергии излучения не более чем в  $\sim 3$  раза. После этого ширина спектра почти не изменяется при увеличении энергии излучения. Этот вывод теории согласуется с представленными на рис. 5 экспериментальными зависимостями  $\Delta\hbar\omega_s = f(D_{ex})$ . При этом надо принять во внимание, что плотность энергии возбуждения  $D_{ex}$  пропорциональна плотности энергии излучения  $D_s$ . Отметим, что упомянутый вывод не мог быть подтвержден, например, в опытах с полупроводниковыми лазерами. Лазеры наиболее часто используют для изучения стимулированного излучения, но сужение спектра в этих приборах в значительной степени создается резонатором. В теории [16] также показано, что увеличение длины активной среды должно приводить к сужению спектра стимулированного излучения. Это качественно объясняет описанное выше изменение экспериментальной зависимости  $\Delta\hbar\omega_s = f(D_{ex})$  при изменении диаметра  $F$ , показанное на рис. 5.

На вставке к рис. 5 результаты измерений зависимости  $\Delta\hbar\omega_s = f(D_{ex})$  при  $F = 0.2$  и 0.7 мм представлены в виде функции  $\Delta\hbar\omega_s = f(D_{ex}F)$ . Обнаруживается, что при обоих диаметрах экспериментальные точки ложатся почти на одну кривую. Это также не противоречит выводу теории [16] о том, что для стимулированного (т. е. усиленного спонтанного) излучения предполагается универсальный вид зависимости  $\Delta\hbar\omega_s = f(\alpha L)$  при заданном спектре спонтанного излучения (здесь  $L$  — длина активной среды,  $\alpha$  — пропорционально и близко по величине к максимальному по спектру значению коэффициента усиления, который должен возрастать при увеличении  $D_{ex}$ ). Заметим, что пока не ясно, различались ли в нашем эксперименте спектры спонтанного излучения при фиксированном  $D_{ex}F$ , но разных  $F$ .

Увеличение диаметра  $F$  (при фиксированной плотности энергии  $D_{ex}$ ) приводило также к концентрации спектра излучения в более длинноволновой области (см. рис. 3). Смещение вершины спектра в длинноволновую сторону при увеличении диаметра от 0.2 до 0.7 мм при фиксированной плотности энергии возбуждения  $D_{ex}$  (см. рис. 4) с ростом  $D_{ex}$  сначала возрастает, а затем насыщается. Пока можно назвать две возможные причины наблюдавшегося в наших опытах смещения спектра излучения при изменении  $F$ . Во-первых, смещение спектра излучения может возникать в результате насыщения усиления излучения на коротковолновом крае спектра, которое должно возникать при увеличении  $F$ . Такое заключение было получено для полупроводникового лазера (со стационарной мощной оптической накачкой) с помощью самосогласованных расчетов пространственно-неоднородных распределений концентрации носителей заряда и плотности фотонов излучения [17]. Согласно [17], концентрация носителей спадает от центра фотовозбужденной области к ее краю, а плотность фотонов, наоборот, возрастает. Во-вторых, смещение спектра при изменении диаметра  $F$

можно качественно объяснить, принимая во внимание, что увеличение  $F$  увеличивает вероятность внутризонного поглощения фотона излучения. При увеличении  $F$  усиление разогрева ЭДП из-за внутризонного поглощения излучения будет уменьшать инверсию заселенностей энергетических уровней носителями заряда. Это следует из теории [23]. При этом будет происходить сужение спектра усиления в сторону его длинноволнового края (совпадающего с краем запрещенной зоны). Это также должно приводить к концентрации излучения в более длинноволновой области.

Итак, экспериментально наблюдались следующие свойства спектра излучения: 1) уменьшение ширины спектра излучения, достигающее насыщения, при увеличении плотности энергии  $D_{ex}$  возбуждающего импульса и при увеличении диаметра луча  $F$ ; 2) универсальный характер уменьшения ширины  $\Delta\hbar\omega$ , спектра излучения как функции произведения  $D_{ex}F$ ; 3) концентрация излучения в более длинноволновой области при увеличении плотности энергии возбуждения  $D_{ex}$  и при увеличении диаметра  $F$ . На основании качественного обсуждения этих свойств показано, что все они характерны для стимулированного (усиленного спонтанного) излучения в полупроводнике без резонатора. В итоге, в отсутствие теории экспериментально получено представление об изменении интегрального по времени спектра мощного нестационарного краевого излучения в тонком слое GaAs при изменениях диаметра луча и энергии мощного пикосекундного импульса оптической накачки. Получено необходимое подтверждение стимулированной природы этого излучения, длительность которого, как показано в предыдущих работах [1,2] и др., находится в пикосекундном диапазоне времен. Такое подтверждение было необходимо, в частности, для анализа целого ряда эффектов [5,20,24], возникающих в фотовозбуждаемой ЭДП при участии излучения.

Настоящая работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 95-02-05871) и ГКНТ России.

Авторы приносят глубокую благодарность Ю.Д. Калафати за подробное обсуждение работы и ценные советы.

## Список литературы

- [1] D. Hulin, M. Joffre, A. Migus, J.L. Oudar, J. Dubard, F. Alexandre. *J. de Physique*, **48**, 267 (1987).
- [2] Н.Н. Агеева, И.Л. Броневои, Е.Г. Дядюшкин, Б.С. Явич. *Письма ЖЭТФ*, **48**, 252 (1988).
- [3] N.N. Ageeva, I.L. Bronevoi, E.G. Dyadyushkin, V.A. Mironov, S.E. Kumekov, V.I. Perel'. *Sol. St. Commun.*, **72**, 625 (1989).
- [4] A.M. Fox, R.J. Manning, A. Miller. *J. Appl. Phys.*, **65**, 4287 (1989).
- [5] I.L. Bronevoi, A.N. Krivonosov, T.A. Nalet. *Sol. St. Commun.*, **98**, 903 (1996).
- [6] J.P. Foing, D. Hulin, M. Joffre, M.K. Jackson, J.L. Oudar, C. Tanguy, M. Combescot. *Phys. Rev. Lett.*, **68**, 110 (1992).
- [7] И.Л. Броневои, С.Е. Кумеков, В.И. Перель. *Письма ЖЭТФ*, **43**, 368 (1986).
- [8] С.Е. Кумеков, В.И. Перель. *ЖЭТФ*, **94**, 346 (1988).
- [9] Ю.Д. Калафати, В.А. Кокин. *Письма ЖЭТФ*, **50**, 462 (1989).
- [10] N.N. Ageeva, V.A. Borisov, I.L. Bronevoi, V.A. Mironov, S.E. Kumekov, V.I. Perel', B.S. Yavich. *Sol. St. Commun.*, **75**, 167 (1990); N.N. Ageeva, I.L. Bronevoi, V.A. Mironov, S.E. Kumekov, V.I. Perel'. *Sol. St. Commun.*, **81**, 969 (1992).
- [11] Yu.D. Kalafati, V.A. Kokin, H.M. Van Driel, G.R. Allan. In: *Hot Carriers in Semiconductors*, ed. by Karl Hess et al. (Plenum Press, N.Y., 1996) p. 587.
- [12] Д.Н. Наследов, А.А. Рогачев, С.М. Рывкин, Б.В. Царенков. *ФТТ*, **4**, 1062 (1962).
- [13] A. Yariv, R.C.C. Leite. *J. Appl. Phys.*, **34**, 3410 (1963).
- [14] Л.Н. Курбатов, С.С. Шахиджанов, Л.В. Быстрова, В.В. Крапухин. *ФТП*, **4**, 2025 (1970).
- [15] T. George, M.A. Khan, S. Krishnankutty, R.A. Skogman, J.N. Kuznia, D.T. Olson. *Appl. Phys. Lett.*, **65**, 520 (1994).
- [16] L.W. Casperson. *J. Appl. Phys.*, **48**, 256 (1977).
- [17] E.O. Goebel, O. Hildebrand, K. Lohnert. *IEEE. J. Quant. Electron.*, **QE-13**, 848 (1977).
- [18] F. Stern. *J. Appl. Phys.*, **47**, 5382 (1976).
- [19] P.S. Кор'ев, С.В. Иванов, А.Ю. Ягоров, Д.Ю. Углов. *J. Cryst. Growth*, **96**, 533 (1989).
- [20] I.L. Bronevoi, A.N. Krivonosov, V.I. Perel'. *Sol. St. Commun.*, **94**, 805 (1995).
- [21] H.C. Casey, M.B. Panish. *Heterostructure Lasers* (Academic Press, London, 1978).
- [22] А.П. Леванюк, В.В. Осипов. *УФН*, **133**, 427 (1981).
- [23] Ю.Д. Калафати, В.А. Кокин. *ЖЭТФ*, **99**, 1793 (1991).
- [24] N.N. Ageeva, I.L. Bronevoi, V.A. Mironov, S.E. Kumekov, V.I. Perel'. In: *Mode-Locked Lasers and Ultrafast Phenomena*, ed. by G.B. Altshuler [Proc. SPIE, **1842**, 70 (1992)]; I.L. Bronevoi, A.N. Krivonosov, V.I. Perel'. *Sol. St. Commun.*, **94**, 363 (1995).

Редактор Л.В. Шаронова

## A spectrum of stimulated emission arising under interband absorption of a picosecond light pulse in a thin layer of GaAs

I.L. Bronevoi, A.N. Krivonosov

Institute of Radioengineering and Electronics,  
Russian Academy of Sciences,  
103907 Moscow, Russia

**Abstract** An image of the variation of spectrum of a powerful non-stationary edge emission in a GaAs thin layer due to the beam diameter and energy changes of a powerful picosecond pulse of optical pumping has been obtained experimentally. (The spectrum being a time integral). This has been regarded as necessary confirmation of a stimulated nature of the pulse emission which is within the picosecond range.

Fax: (095) 203-8414 (Bronevoi)

E-mail: bil@mail.cplire.ru (Bronevoi)