

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ GaAs(Si) ПРИ ФОТО- И ЭЛЕКТРОВОЗБУЖДЕНИИ

Королев В. Л., Сидоров В. Г.

Экспериментально показано, что наблюдаемое различие спектров люминесценции GaAs(Si) при фото- и электровозбуждении не является следствием зависимости механизмов рекомбинации от способа возбуждения, а связано с самопоглощением люминесценции в толще структуры. При этом также установлено, что областью генерации электролюминесценции в светодиодных структурах из GaAs(Si) с концентрацией кремния $\sim 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ является p -область в $3 \div 12 \text{ мкм}$ от p - n -перехода.

Эксперимент показывает [1-4], что для p - n -структур из GaAs(Si) в максимумах спектров фото- и электролюминесценции (ФЛ и ЭЛ) всегда $h\nu_{\text{ФЛ}} > h\nu_{\text{ЭЛ}}$ независимо от того, в какой части структуры возбуждается ФЛ (при этом ЭЛ обычно измеряется со стороны n -подложки). Это различие обычно не связывают с действием толщи структуры на ЭЛ, а авторы работ [3, 4] используют его как повод для рассмотрения различия механизмов рекомбинации при фото- и электровозбуждении. Суть их модели состоит в следующем: возбужденные светом неравновесные носители заряда релаксируют до уровня протекания, откуда рекомбинируют с излучением, тогда как при электровозбуждении носители туннельным способом заполняют в основном наиболее глубокие ямы хвостов плотности состояний (ХПС), что и приводит к $h\nu_{\text{ФЛ}} > h\nu_{\text{ЭЛ}}$. Но такая модель вызывает ряд серьезных возражений. Во-первых, невозможно представить туннелирование электронов на расстояния до десятков микрометров, с которыми связывается область генерации ЭЛ [5, 6]. Во-вторых, в диапазоне регистрации ЭЛ на ВАХ p - n -GaAs(Si) туннельных токов не наблюдается [5, 7]. Если же заполнение ХПС происходит «протеканием» по перевалам потенциального рельефа, то основания для зависимости люминесценции от способа возбуждения исчезают. Кроме того, в предлагаемой модели [3, 4] положение максимума ФЛ при низких температурах не должно зависеть от уровня возбуждения, что противоречит эксперименту [6]. В настоящей работе приводятся экспериментальные данные, показывающие ошибочность модели авторов [3, 4].

Сначала путем сравнительного исследования ВАХ и люминесцентных характеристик структур, а также спектров ЭЛ при различных напряжениях на p - n -переходе было установлено, что при плотностях тока более 10^{-3} А/см^2 ЭЛ не связана с диагональным туннелированием [8], а обусловлена рекомбинацией в квазинейтральной области диода. Отсюда следует, что электрическое поле p - n -перехода не является причиной различия спектров ЭЛ и ФЛ.

Проверка влияния толщи структуры на спектры ЭЛ может быть выполнена при исследовании распределения ФЛ по толщине структуры, когда регистрация последней поставлена в условия, соответствующие регистрации ЭЛ, а именно со стороны подложки. При этом спектр ФЛ, измеренный в традиционной геометрии «на отражение» (ФЛО), будет характеризовать свойства возбуждаемого слоя, а отличия от него в спектре, измеренном в геометрии «на просвет» (ФЛП), могут быть приписаны действию толщи структуры. Если в такой геометрии измерений с послойным удалением материала структуры на некоторой глубине h от поверхности обнаружится идентичность спектральных характери-

стик ФЛП и ЭЛ, то исчезнут основания для различия механизмов люминесценции при электро- и фотовозбуждении, а слой на глубине h можно будет принять за активную область светодиода. Кроме того, такой эксперимент позволяет сравнивать и определять уровни возбуждения для ФЛП и ЭЛ по величине мощности регистрируемого излучения, избегая приближенной процедуры оценки избыточных концентраций носителей заряда при фотовозбуждении.

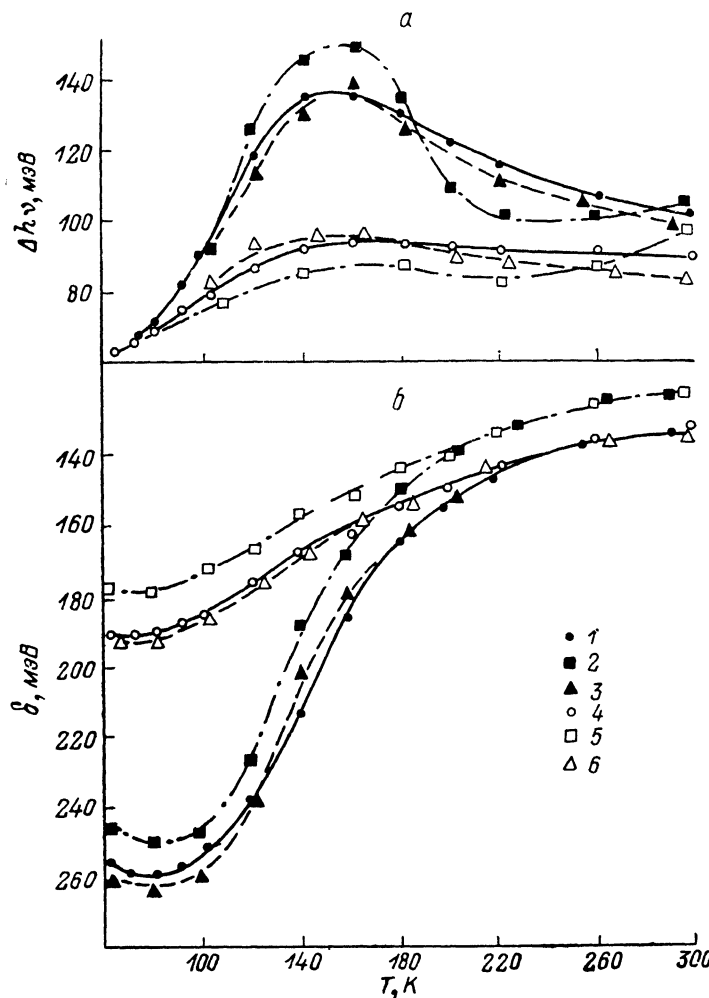


Рис. 1. Температурные зависимости полуширины (а) и дефицита энергии спектрального максимума (б) для спектров электро- и фотолюминесценции при $h=69$ мкм.

1, 4 — ЭЛ при $j=10^{-2}$ и 3 А/см² соответственно; 2, 3 — ФЛО и ФЛП при уровне возбуждения $\Phi_B = 3 \cdot 10^{17}$ фот/см² · с; 5, 6 — то же при $\Phi_B = 10^{20}$ фот/см² · с.

Описанный эксперимент выполнен на структурах GaAs(Si) с концентрацией Si в слоях $\sim 3 \cdot 10^{18}$ см⁻³ (0.4 вес% в растворе-расплаве). ФЛО, ФЛП и ЭЛ измерялись в интервале температур 64–300 К. ФЛ возбуждалась лазером ЛГ-75 ($h\nu_B=1.97$ эВ), плотность возбуждения Φ_B изменялась от $3 \cdot 10^{17}$ до 10^{20} фот/см² · с при диаметре светового пятна 0.1–0.3 мм. Материал структуры удалялся в полирующем травителе с шагом травления 1–5 мкм, при этом на подложку каждый раз наносился защитный слой. На каждом шаге травления $C-V$ -методом определялась концентрация основных носителей заряда ($p_0=N_A-N_D$ или $n_0=N_D-N_A$). Измерения ЭЛ выполнены на серии из пяти образцов светодиодов с размерами ~ 3 мм², изготовленных из той же эпитаксиальной структуры, при плотностях тока $j=10^{-3}$ –30 А/см².

Спектры ЭЛ представляли собой одну полосу, форма и положение которой зависели от уровня возбуждения и температуры. Изменения спектральных

характеристик, таких как дефицит энергии спектрального максимума $\delta_{ЭЛ}$ относительно ширины запрещенной зоны чистого материала E_{g0} ($\delta_{ЭЛ} = E_{g0} - h\nu_{ЭЛ}$) и полуширина спектра $\Delta h\nu_{ЭЛ}$, были подробно обсуждены в работе [9]. Их температурные зависимости для двух плотностей тока представлены на рис. 1. Основные закономерности поведения спектров ЭЛ согласуются с известными ранее [2, 6, 7] и заключаются в коротковолновом сдвиге спектра с увеличением плотности тока при $T < 200$ К, а также в исчезновении токовой зависимости и плавном уменьшении $\delta_{ЭЛ}$ при более высоких температурах.

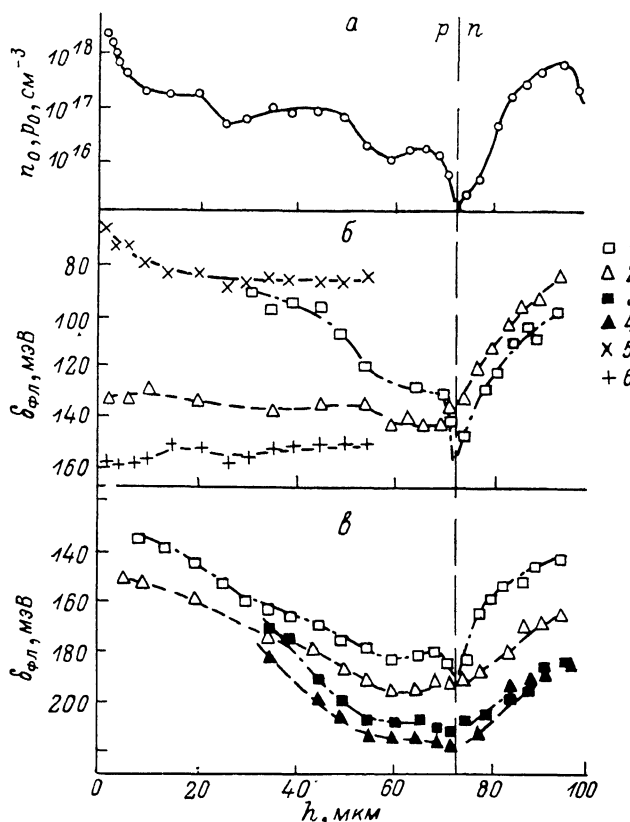


Рис. 2. Координатные распределения концентрации основных носителей заряда при 300 К (а) и дефицита энергии спектрального максимума фотолюминесценции при 300 (б) и 80 К (в).

1, 2 — ФЛО и ФЛП при уровне возбуждения $\Phi_B = 10^{20}$ фот/см²·с; 3, 4 — то же при $\Phi_B = 6 \cdot 10^{18}$ фот/см²·с; 5, 6 — ФЛО, коротковолновая и длинноволновая полосы соответственно.

Спектры ФЛО и ФЛП при изменении трех независимых переменных h , T и Φ_B исключительно разнообразны. Характер трансформации спектров в зависимости от всех параметров удобно проследить по изменению дефицита δ и полуширины $\Delta h\nu$ (рис. 2). На рисунке также показаны координатные распределения отдельных полос в спектрах ФЛО там, где было возможно их распределение.

В спектрах ФЛО вблизи p -поверхности наблюдаются два максимума. Интенсивность коротковолновой (КВ) полосы растет с ростом T и «следит» за концентрацией дырок p_0 в слое (рис. 2, а), что свидетельствует о связи КВ полосы с рекомбинацией электронов на свободных дырках. При $h > 35$ мкм, когда $p_0 < 10^{17}$ см⁻³ и интенсивность КВ полосы на порядок и более меньше интенсивности длинноволновой (ДВ) полосы, спектр формируется в основном ДВ полосой, т. е. при $p_0 < 10^{17}$ см⁻³ можно считать, что все дырки локализованы в ХПС.

Спектры ФЛП, как и спектры ЭЛ, всегда однополосны и имеют меньшую полуширину, чем ФЛО, за счет более крутого спада коротковолнового края.

Количественное сопоставление спектров ФЛП и ЭЛ обнаружилось полную идентичность их характеристик δ , $\Delta h\nu$ и ϵ (ϵ из зависимостей $\delta_{\text{ФЛП}} = \delta_0 - \epsilon_{\text{ФЛП}} \ln \Phi_V$, $\delta_{\text{ЭЛ}} = \delta_0 - \epsilon_{\text{ЭЛ}} \ln j$), когда ФЛП возбуждалась в p -области на расстоянии $3 \div 12$ мкм от p - n -перехода ($h = 60 \div 69$ мкм) (рис. 1). При этом для $T > 180$ К для данного локального участка структуры $\delta_{\text{ФЛО}} - \delta_{\text{ЭЛ}} = 10 \div 15$ мэВ, что соответствует результату работ [2, 3]. Уравнивание абсолютных мощностей излучения для ФЛП и ЭЛ путем подбора тока через структуру при одинаковых площадях возбуждаемой области позволило определить соотношения параметров Φ_V и j , приводящих к идентичности спектров ФЛП и ЭЛ (рис. 1), и непосредственно сопоставить уровни фото- и электровозбуждения, не прибегая к приближенным численным оценкам. В пользу идентичности ФЛП и ЭЛ говорит и такой факт в спектрах ЭЛ и ФЛП для области с $h = 60 \div 69$ мкм интенсивность полосы с максимумом ~ 1 эВ в $10 \div 100$ раз ниже, чем в ФЛО.

Таким образом, вся совокупность экспериментальных данных свидетельствует о наличии в p -слое структуры области, для которой спектральные характеристики ФЛП во всем исследованном температурном диапазоне идентичны характеристикам ЭЛ светодиодов и заметно отличаются от ФЛО при одинаковом уровне фото- и электровозбуждения. Это позволяет утверждать, что механизмы рекомбинации при фото- и электровозбуждении идентичны, а наблюдаемое различие спектров ФЛО и ЭЛ вызвано различием условий регистрации и связано с действием толщи структуры. Соответствующая область структуры, где наблюдается идентичность спектров ФЛП и ЭЛ (для исследованных структур это p -область в $3 \div 12$ мкм от p - n -перехода), является областью генерации ЭЛ.

Следует отметить, что при высоких температурах в области структуры $h > 70$ мкм наблюдается антистоксовский сдвиг спектра ФЛ $\delta_{\text{ФЛП}} < \delta_{\text{ФЛО}}$ при прохождении излучения через структуру (рис. 2, б). Так как при этом полностью удален p -слой и возбуждается наиболее узкозонная часть структуры, то сдвиг спектра может быть связан с действием эффекта переизлучения при квазиравновесном распределении носителей заряда, возбужденных самопоглощением. Отсюда следует, что структура не только поглощает излучение, но и является активным фильтром.

Л и т е р а т у р а

- [1] Сушков В. П., Любаницкая Е. Б. — ФТП, 1974, т. 5, в. 12, с. 2257—2264.
- [2] Коваленко В. Ф., Лисовенко В. Д., Марончук И. Е., Прохорович А. В., Тузовский А. М. — Полупроводн. техн. и микроэлектрон., 1978, № 28, с. 41—44; 1978, № 28, с. 45—48.
- [3] Коваленко В. Ф., Прохорович А. В. — Оптоэлектрон. и полупроводн. техн., 1982, № 2, с. 61—64.
- [4] Коваленко В. Ф., Прохорович А. В. — ФТП, 1982, т. 16, в. 11, с. 2064—2065.
- [5] Byer N. E. — J. Appl. Phys., 1970, v. 41, N 4, p. 1597—1601; 1970, v. 41, N 4, p. 1602—1607.
- [6] Аскарлов П. А., Дмитриев А. Г., Царенков Б. В. — ФТП, 1977, т. 11, в. 9, с. 1834—1836.
- [7] Бусов В. М., Гореленок А. Т., Марахонов В. М. — ФТП, 1974, т. 8, в. 10, с. 1883—1887.
- [8] Юнович А. Э., Ормонт А. Б. — ЖЭТФ, 1966, т. 51, в. 5, с. 1292—1305.
- [9] Королев В. Л., Россин В. В., Сидоров В. Г., Шалабутов Ю. К. — ФТП, 1985, т. 19, в. 3, с. 525—527.

Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина

Получена 7.07.1987

Принята к печати 16.05.1988