

УДК 621.382.3

ШУМЫ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В ДВУХПОЛОСНЫХ GaP-СВЕТОДИОДАХ

В. В. Потемкин, Ю. М. Мамонтов

На основе корреляционного метода исследованы шумы люминесценции в двухполосных GaP-светодиодах, излучающих красную (690 нм) и зеленую (560 нм) полосы света. Измерена корреляция флуктуаций люминесценции в каждой из полос с токовыми шумами и между собой. Показано, что избыточная компонента полного тока диода является источником шумов красной полосы люминесценции светодиодов во всем диапазоне токов, а диффузионная компонента шумов люминесценции не создает. Даны рекомендации уменьшения шумов люминесценции светодиодов за счет выбора нагрузки цепи и режима тока.

По шумам электролюминесценции светодиодов имеется достаточное количество публикаций, среди которых следует выделить фундаментальный труд Лукьянчиковой [1], где получены выражения для спектров шумов излучения S_w и коэффициентов их корреляции с флуктуациями тока, протекающего через люминесцирующую систему K_{wv} .

В последние годы появились светодиоды [2], излучающие одновременно в двух полосах спектра: красной (690 нм) и зеленой (560 нм). Особенности излучения этих диодов обуславливают специфический характер флуктуаций этого излучения, которые представляют интерес и раньше не исследовались. Результаты исследования шумов люминесценции обеих полос и коэффициенты их корреляции с шумами тока изложены в настоящей работе.

Экспериментальная методика. В основу методики лег корреляционный метод измерений слабых сигналов [3]. Экспериментальная установка была в основе аналогична установке, приведенной в работе [4], но дополнена необходимыми для цели наших исследований бипризмой Френеля, разделяющей излучение образца на два равных потока, и светофильтрами, выделяющими красную и зеленую составляющие спектра из этих потоков. Измерения проводились на партии образцов, изготовленных из GaP, причем, p -область была легирована Zn и O, а n -область — N. Кроме того, в материал был введен компенсирующий донор Te.

Все измерения проводились на частоте $f_0 = 300$ Гц в частотном диапазоне $\Delta f = 30$ Гц.

Коэффициент корреляции шумов люминесценции с токовыми шумами и коэффициент взаимной корреляции шумов люминесценции двух полос излучения вычислялись по известной формуле [3]: $K_{lm} = S_{lm} / \sqrt{S_{ll} S_{mm}}$.

Результаты и их обсуждение. Полный ток через светодиод состоит из трех составляющих: i_d — диффузионной, i_r — рекомбинационной и $i_{изб}$ — избыточной. В работе [1] показано, что шумы люминесценции могут быть обусловлены флуктуациями любой из следующих величин: δi_d , δi_r , $\delta i_{изб}$ — диффузионной, рекомбинационной и избыточной составляющей соответственно, а также флуктуациями сопротивления базовой части образца δR_b . С помощью разработанной в [1, 5] таблицы (рис. 1)

можно судить о вкладе тех или иных источников шума по ходу зависимости S_W от сопротивления нагрузки R_H и по знаку коэффициента корреляции K_{WU} , где S_W — спектральная плотность шумов люминесценции, K_{WU} — коэффициент корреляции шумов люминесценции с шумами прямого тока через диод. В нашей работе мы используем этот подход для трактовки полученных данных.

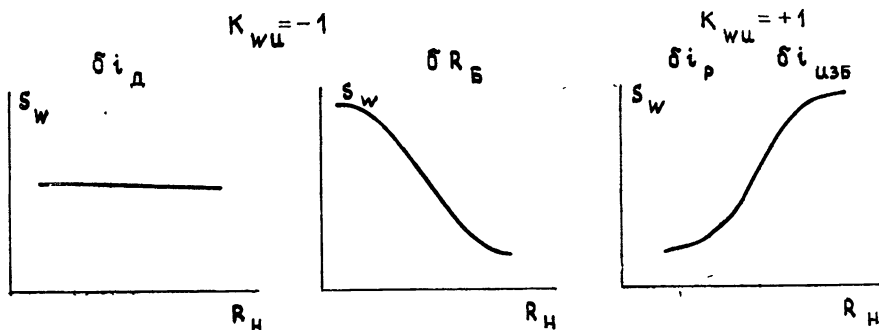


Рис. 1.

В результате измерений были получены зависимости спектральных плотностей шума люминесценции $S_{W_{кр}}$ — для красной полосы, $S_{W_{зел}}$ — для зеленой полосы и S_U — спектральной плотности токового шума от тока через диод, а также вычислены коэффициенты корреляции шумов люминесценции с шумами тока $K_{W_{кр}U}$ — для красной полосы, $K_{W_{зел}U}$ — для зеленой полосы, $K_{W_{кр}W_{зел}}$ — коэффициент корреляции шумов красной и зеленой полос излучения (рис. 2). Были исследованы также зависимости $S_{W_{кр}}$, $S_{W_{зел}}$ от нагрузочного сопротивления R_H (см. рис. 3, где кривая 1 — $S_{W_{кр}}$ ($I = 10^{-3} A$), 2 — $S_{W_{зел}}$ ($I = 3 \cdot 10^{-2} A$), 3 — $S_{W_{кр}}$ ($I = 3 \cdot 10^{-2} A$), 4 — $S_{W_{зел}}$ ($I = 10^{-3} A$)).

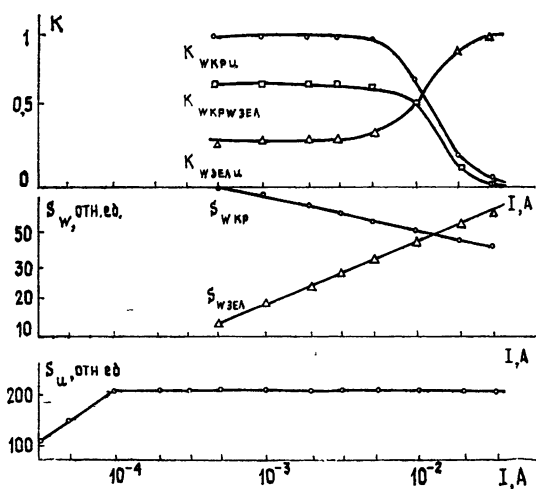


Рис. 2.

Из рис. 2 видно, что излучение имело место в той области токов, где величина S_U для токовых шумов уже достигала насыщения. Коэффициенты $K_{W_{кр}U}$ и $K_{W_{зел}U}$ во всем диапазоне токов были положительны, т. е. источником флуктуаций (см. рис. 1) могут быть только рекомбинационная или избыточная составляющие тока диода. Характерное

возрастание $S_{W_{кр}}$ и $S_{W_{зел}}$ (см. рис. 3) с увеличением нагрузочного сопротивления светодиода также указывает на то, что источник флуктуаций — рекомбинационная или избыточная компоненты тока.

В области малых смещений ($I < 5 \cdot 10^{-3} A$) имеется полная корреляция шумов люминесценции красной полосы и токовых шумов $K_{W_{кр}U} = 1$. Следовательно, в указанной области налицо один и тот же источник шума. Последующее уменьшение $K_{W_{кр}U}$ с увеличением смещения при неизменном характере поведения $S_{W_{кр}}$, по-видимому, означает, что источник люминесцентных флуктуаций красной полосы остается тем же и совпадает с источником токовых флуктуаций ($I < 5 \cdot 10^{-3} A$) и при больших смещениях, а источник токовых флуктуаций S_U изменяется. Это объясняется тем, что избыточные шумы (см. ниже) постепенно начинают уступать место дробовым, которые, как известно [3], возрастают с током $S_U \sim I$. Обратное предположение о том, что источник токовых флуктуаций один и тот же, а источник люминесцентных флуктуаций красной полосы меняется, ведет к очевидным противоречиям. Было показано [1], что в области плоского участка зависимости $S_U(I)$, по крайней мере ее начального участка, источником флуктуаций является избыточная компонента $i_{изб}$. Следовательно, она же есть источник флуктуаций красной полосы излучения во всем диапазоне.

В соответствии с этим уменьшение $K_{W_{кр}U}$ в области $I > 5 \cdot 10^{-3} A$ означает, что в токовых шумах начинает превалировать иной источник, нежели избыточная составляющая. Так как коэффициент корреляции остается положительным в этом диапазоне, а $S_{W_{кр}}$ и $S_{W_{зел}}$ возрастают с увеличением R_H (см. рис. 3), то в этой области токов за шумы ответственна рекомбинационная компонента i_p полного тока.

Рассмотрим теперь зависимость шумовых характеристик зеленой полосы от тока. Поскольку коэффициент корреляции $K_{W_{зел}U}$ в области больших токов ($I > 5 \cdot 10^{-3} A$) постепенно увеличивается до единицы, то можно сделать вывод, что так как в этой области токов за токовые шумы ответственна рекомбинационная составляющая, то она же является источником шумов зеленой люминесценции.

Уменьшение коэффициента корреляции $K_{W_{зел}U}$ при меньших токах ($I < 5 \cdot 10^{-3} A$) свидетельствует о том, что наравне с рекомбинационной составляющей здесь становится существенным иной источник флуктуаций. Значение коэффициента $K_{W_{зел}U} > 0$ и возрастание $S_{W_{зел}}$ с ростом нагрузочного сопротивления R_H (см. рис. 3) означает, что этим источником является избыточная составляющая $i_{изб}$ полного тока. Причем постоянное значение коэффициента корреляции, приблизительно равное 0,3, указывает на то, что основной вклад в этой области токов вносит рекомбинационная составляющая, и в меньшей степени шумы зеленой люминесценции обусловлены избыточной составляющей. Это также подтверждается тем фактом, что коэффициент корреляции $K_{W_{кр}W_{зел}}$ в этой области $> 0,5$. Таким образом, при малых токах (до $5 \cdot 10^{-3} A$) флуктуации зеленой полосы свечения обусловлены отчасти рекомбинационной составляющей, отчасти — избыточной. При больших токах их источником являются флуктуации только рекомбинационной составляющей. Рассмотрим теперь справедливость допущения о том, что источник шумов красной полосы люминесценции остается постоянным во всем диапазоне токов, в то время как источник токовых шумов с ростом тока изменяется. В самом

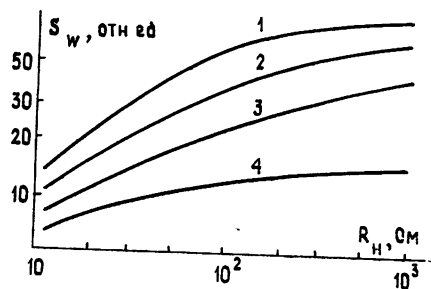


Рис. 3.

деле, если во всем диапазоне токов источник токовых шумов — избыточная составляющая, то из уменьшения коэффициента корреляции $K_{W_{кр} U}$ следует, что при токах $I > 5 \cdot 10^{-3}$ А источник шумов красной полосы люминесценции — рекомбинационная составляющая тока диода. Коэффициент корреляции шумов красной и зеленой полос излучения $K_{W_{кр} W_{зел}}$ в этой области стремится к нулю (см. рис. 2), т. е. шумы зеленой полосы обусловлены избыточной составляющей, и по мере уменьшения тока ($I < 5 \cdot 10^{-3}$ А) в эти шумы начинает вносить некоторый вклад рекомбинационная составляющая. Если бы это было так, то коэффициент корреляции $K_{W_{зел} U}$ был бы больше 0,5, ибо установлено, что в области тока $I < 5 \cdot 10^{-3}$ А токовые шумы вызываются флуктуациями избыточной составляющей. Результаты эксперимента показывают обратное: $K_{W_{зел} U} < 0,5$ при токах $I < 5 \cdot 10^{-3}$ А. Это противоречие доказывает, что источник флуктуаций красной полосы излучения один и тот же во всем диапазоне, а в токовых флуктуациях существуют два различных источника: избыточная составляющая (при $I < 5 \cdot 10^{-3}$ А) и рекомбинационная составляющая (при $I > 5 \cdot 10^{-3}$ А), имеющая преимущественно дробовой характер, как было отмечено выше.

Остановимся на интересной особенности отношения сигнал/шум в этих светодиодах. Спектральная плотность флуктуаций для них выражается формулой $S_W \sim W^2/I^2$, которая легко получается из базисной формулы (4.32) [1]. Поэтому отношение сигнал/шум $\sim W^2/(W^2/I^2)$ растет с током.

В заключение кратко резюмируем результаты работы.

1) Показано, что источником шумов красной полосы люминесценции светодиодов во всем диапазоне токов является избыточная составляющая полного тока.

2) Шумы зеленой полосы люминесценции в основном обусловлены рекомбинационной составляющей при некоторой роли избыточной составляющей в области малых токов $I < 5 \cdot 10^{-3}$ А.

3) Флуктуации последних двух составляющих полного тока вызывают модуляцию тока инжекции неосновных носителей, с которыми связана люминесценция. Таким образом, установлено, что исследованные шумы являются шумами модуляционного типа.

4) Показано, что диффузионная компонента не создает шумов люминесценции.

5) Для уменьшения шумов люминесценции диодов такого типа необходимо:

а) уменьшить нагрузочное сопротивление R_n ,

б) увеличивать ток через светодиод.

В заключение считаем своим долгом выразить глубокую благодарность А. Э. Юновичу за представленные образцы и ценные указания, а также В. А. Базыленко за помощь в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лукьянчикова Н. Б. Диссертация. Киев, 1976.
2. Барнинова Э. Ю., Вишневская Б. И., Голубев Ю. А. и др.— ФТП, 1979, 13, с. 478.
3. Ван-дер-Зил А. Шум. Источники, описание, измерение./Пер. с англ./Под ред. А. К. Нарышкина.— М.: Сов. радио, 1973.
4. В о r h у J. J.— J. Appl. Phys., 1967, 38, p. 2465.
5. Лукьянчикова Н. Б. и др.— Укр. физ. журн., 1975, 20, с. 946.

Based on correlation method luminescence noises are investigated in two-band GaP-light diodes radiated a red (690 nm) and a green (560 nm) light bands. Correlation of the luminescence fluctuations is measured in each of the bands with current noises and between them. It is shown that the excess component of the diode absolute current is the noise source of the red luminescence band of light diodes in all the current range. The diffuse component does not create luminescence noises. Recommendations are given for luminescence noise decrease due to the choice of the load for the circuit and the current regime.

ИНФОРМАЦИЯ О НОВЫХ КНИГАХ

Климонтович Ю. Л. Статистическая физика: Учебное пособие.— М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1982.— 35 л.

Курс отличается от существующих как по содержанию, так и по характеру изложения. Наряду с традиционным материалом излагается ряд проблем, которые в настоящее время служат основой общих и специальных курсов, читаемых, например, на радиофизических отделениях университетов. Среди них: теория неравновесных флуктуаций в нелинейных системах, соотношение временных и фазовых средних, кинетическая теория электромагнитных процессов, неравновесные фазовые переходы, турбулентность, кинетическая теория химически реагирующих систем. Весь материал излагается на основе единого метода. Это позволяет выявить внутреннюю связь явлений в простейших и самых сложных системах.

Пособие предназначено для студентов старших курсов физических и радиофизических специальностей университетов, физико-технических и инженерно-физических институтов, а также аспирантов соответствующих специальностей.

Распространение звука во флуктуирующем океане: Пер. с англ./Под ред. С. Флатте.— М.: Мир, 1982.— 17 л., ил.

В книге, входящей в известную кембриджскую серию книг по прикладной математике, рассмотрено влияние случайных неоднородностей в океане на процессы распространения звука, что имеет большое теоретическое и прикладное значение в гидроакустике. Дано описание океанической среды, изложена теория распространения звука в океане, в том числе теория звукового канала, рассмотрено поведение звука в однородном океане и в неоднородном флуктуирующем океане. Большое внимание уделено внутренним волнам и использованию различных машинных методов. В числе авторов Д. Дамен, У. Манк, К. Уотсон и др.

Книга предназначена для физиков, геофизиков, океанологов — специалистов и студентов, занимающихся исследованием акустики океана.

Гроссе П. Свободные электроны в твердых телах: Пер. с нем.— М.: Мир, 1982.— 16 л., ил.

В книге известного западногерманского ученого и педагога П. Гроссе на основе модели Друде—Лоренца рассматриваются такие явления, как электропроводность, поглощение света, особенности спектров отражения полупроводников и металлов, эффекты Холла и Фарадея, геликонные волны и др.

Предельное упрощение математического аппарата, модельный подход, четкость и ясность изложения задачи, оригинальные рисунки — все это делает книгу весьма полезной как для физиков и инженеров, так и для студентов физических и физико-химических специальностей при изучении курса физики твердого тела.