

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382.3.

Викулин И.М., Горбачев В.Э., Коробицын Б.В., Криськив С.К.
Vikulin I.M., Gorbachev V.E., Korobitzin B.V., Kryskiv S.K.

ОБРАБОТКА И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СПЕКТРОВ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

PROCESSING AND PRESENTATIONS OF THE SPECTRUM OF OPTOELECTRONIC DEVICES

Аннотация. В статье обсуждаются перспективные подходы к проблемам измерения, обработки и представления спектральных зависимостей в области оптоэлектроники. Предложен способ графического разделения перекрывающихся полос люминесценции. Показано удобство применения специальных координат для анализа физических явлений на примере описания спектров люминесценции арсенида галлия.

Summary. In this article the perspective approach to problem of the measurement, the processing and presentations of the spectral dependencies in the field of the optoelectronic are discussed. The way of graphic division of the overlaying spectrum-line of luminescence is offered. The comfort of the using the special coordinates for analysis of the physical phenomenas is shown for example for a description of the spectrum of luminescence of gallium arsenide.

Оптоэлектроника охватывает вопросы изучения основных физических явлений и приборов, в основе которых находится взаимодействие между электромагнитным излучением и электронными процессами в полупроводниках. Эти явления обусловлены либо поглощением излучения, либо генерацией излучения при протекании тока.

В прикладном аспекте наблюдается непрерывный прогресс в производстве высокочувствительных приемников излучения в широком спектральном диапазоне и электролюминесцентных источников света, а также расширение областей применения оптоэлектронных устройств [1]. Научный же подход к таким вопросам дает возможность более глубокого понимания фундаментальных свойств полупроводников, многие из которых уже изучены лучше, чем металлы и изоляторы [2].

Наряду с несомненными успехами существует и ряд нерешенных проблем, связанных с пониманием тонких деталей физических процессов в оптоэлектронных приборах. Прогресс здесь связан, в первую очередь, с измерением и обработкой спектров.

Целью настоящей работы является разработка способов измерения, обработки и представления спектров оптоэлектронных приборов, наиболее удобных для построения физических моделей явлений.

Возможны различные подходы как к способам измерения, так и к способам представления этих спектров. При решении технических задач обычно измеряют зависимость интенсивности (мощности) излучения от длины волны [3, 4]. При исследовании физических процессов такой подход не всегда оптимален, так как основной задачей является исследование спектров с целью построения той или иной физической модели явления [2].

Для анализа физических процессов удобнее, очевидно, в качестве спектральной координаты использовать именно энергию фотонов, а не длину волны. Это позволяет непосредственно сопоставлять энергию фотона с шириной запрещенной зоны используемого полупроводника и с энергией активации участвующих в процессах примесей. Поэтому в качестве спектральной координаты удобнее выбирать энергию фотона.

При измерении спектров люминесценции должны быть обеспечены условия неискаженной регистрации спектральных полос. Наш опыт показывает, что близкая по форме к симметричной полоса регистрируется неискаженной, если спектральная ширина щели монохроматора по крайней мере трижды укладывается в полуширину измеряемой полосы. (Спектральная ширина щели равна произведению линейной дисперсии монохроматора на геометрическую ширину выходной щели). Неискаженной же будем считать спектральную полосу, у которой энергия в максимуме излучения и полуширина уже не изменяется при ужесточении условий регистрации.

Наблюдаемые спектры излучений электролюминесценции и фотолюминесценции часто содержат накладывающиеся друг на друга полосы, вызванные различными механизмами рекомбинации. Правильно судить о них можно только после их отдельного, независимого рассмотрения. Для этого необходимо их разделить. Это представляет определенные трудности.

Нами разработан способ графического разделения спектральных полос при видимом их перекрытии и влиянии каждой из полос на общий регистрируемый контур в предположении их симметричности. На рис. 1 показан спектр, состоящий из двух в значительной степени перекрывающихся полос. Для получения отдельных спектральных полос производили следующее. Вначале достраивали симметричное крыло каждой полосы, условно считая их неискаженными, и получали условные контуры полос I и I' . Затем строили так называемые разностные контуры полос 2 и $2'$, вычитая из условного контура каждой полосы накладывающуюся часть соседней полосы. Действительные контуры каждой спектральной полосы 3 и $3'$ получались как среднее арифметическое ее условного и разностного контуров. Действенность описанного способа разделения спектральных полос была проверена следующим образом: вначале записали для различных арсенид-галлиевых диодов два отдельных спектра электролюминесценции, состоящих их единичных полос с близкими энергиями в максимумах излучения. Затем записали оптически смешанный спектр электролюминесценции двух диодов сразу. После этого произвели разделение полос спектра описанным способом и сравнили полученные разделение полосы с исходными отдельными. Оказалось, что и энергия в максимуме излучения, и полуширина каждой из полос, полученных графическим разделением, не отличается от исходных составляющих в пределах погрешности измерений отдельных полос.

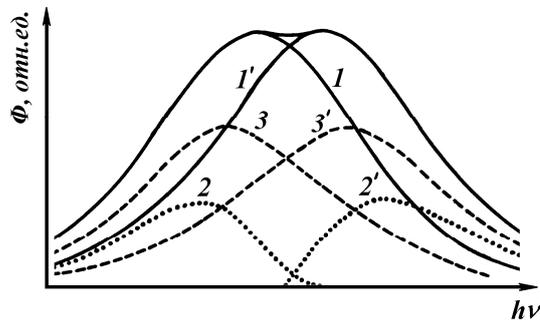


Рисунок 1 – Схема графического разделения спектральных полос:

I и I' – условные контуры полос; 2 и $2'$ – разностные контуры полос; 3 и $3'$ – действительные контуры полос. $\Phi_2 = \Phi_1 - \Phi_1'$; $\Phi_2' = \Phi_1' - \Phi_1$; $\Phi_3 = (\Phi_1 + \Phi_2) \cdot 0,5$; $\Phi_3' = (\Phi_1' + \Phi_2') \cdot 0,5$

Когда интенсивность одной из перекрывающихся полос более чем в три раза превосходила другую, контур большей полосы получали, достраивая его до симметричного, а контур меньшей полосы получали простым вычитанием симметричного контура из общего. (При этом энергия в максимуме меньшей полосы значительно изменялась).

Этот способ, примененный нами при изучении спектров электролюминесценции арсенид-галлиевых p - n -структур, позволил получить количественные результаты и построить физическую модель исследуемых процессов [5].

Другой проблемой при анализе спектров может быть выбор единиц измерения интенсивности излучения. В принципе, возможны два варианта единиц: мощность излучения (относительная интенсивность I) и плотность потока фотонов Φ . Относительная интенсивность используется значительно чаще. Однако плотность потока фотонов нам представляется предпочтительной. Рассмотрим спектр электролюминесценции арсенид-галлиевого диода, представленный на рис. 2 [6]. Спектр состоит из трех полос в спектральном интервале, в котором энергия фотонов изменяется в 1,7 раза. Авторы представили зависимость интенсивности излучения от энергии фотонов (сплошная линия). Если этот же спектр представить как зависимость плотности потока фотонов от энергии фотонов, то он примет иной вид (штриховая линия).

Теперь видно, какая доля фотонов излучается в тех или иных полосах, т.е. по спектру в таких координатах можно судить об интенсивности рекомбинационных процессов, что для исследователя очень важно. По преобразованному спектру видно, что интенсивность рекомбинационных процессов, вызывающих низкоэнергетические полосы, заметно выше, чем казалось из начального вида спектра. Так, если полосы содержат фотоны, отличающиеся по энергии в два раза, то при равенстве относительной интенсивности полос плотность потока фотонов в низкоэнергетической полосе на самом деле вдвое выше. В более поздних работах этой школы приводятся спектральные зависимости именно плотности потока фотонов [7]. Это крайне важно при исследовании спектров в широкой

области энергий фотонов, особенно при сравнении с теоретическими моделями, которые дают скорость рекомбинационных процессов, а не их энергетическую интенсивность [2].

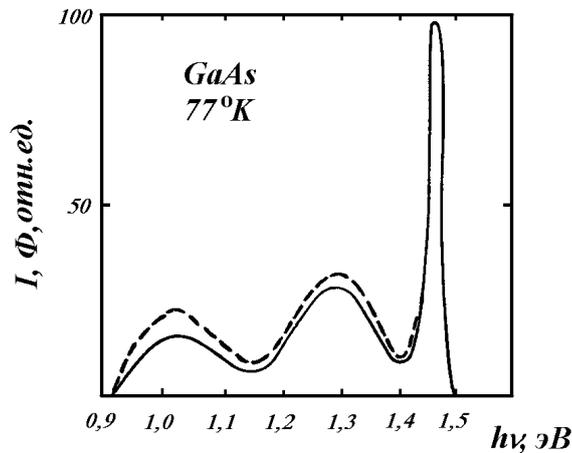


Рисунок 2 – Спектры излучения арсенид-галлиевого светоизлучающего диода:
сплошная линия – интенсивность (мощность) излучения I по данным [6];
штриховая линия – плотность потока фотонов Φ

Спектральные характеристики фотоприемников тоже зачастую имеет смысл приводить к плотности потока фотонов. Так, например, по данным [2] спектральная характеристика идеального фотонного приемника имеет вид пилообразной линии I , изображенной на рис. 3, которая показывает, что относительная чувствительность D фотоприемника линейно растет с ростом длины волны при постоянной энергии падающего излучения до некоторого максимального значения, падая затем скачком до нуля. Такая форма спектра не позволяет сразу сделать четкий вывод о физических процессах в таком фотоприемнике. Мы пересчитали этот спектр на постоянную плотность потока фотонов, т. е. привели к равному числу падающих фотонов. Спектральная характеристика приобрела совершенно другой вид, изображенный штриховой линией 2 . Теперь сразу виден вывод: чувствительность фотоприемника к одному падающему фотону D' в пределах длины волны от нуля до максимума постоянна. Это демонстрирует удобство такого представления для развития физических моделей явлений.

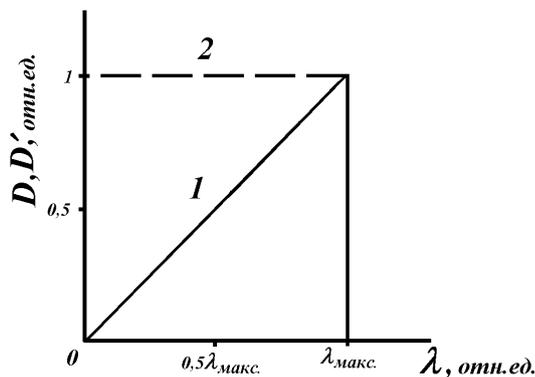


Рисунок 3 – Спектр чувствительности идеального фотонного приемника:
 I – при постоянной энергии падающего излучения по данным [2];
 2 – при постоянной плотности потока фотонов

Спектральную координату в единицах энергии фотонов можно изображать двояко: непосредственно как энергию излучаемых фотонов $h\nu$, так и как разницу между энергией фотонов и шириной запрещенной зоны для данной температуры $h\nu - E_g$, т.е. дефицит энергии фотона относительно ширины запрещенной зоны. Второй вариант предпочтительнее, так как позволяет отвлекаться от температурной зависимости ширины запрещенной зоны. Отрицательное значение такой координаты показывает, что энергия фотона меньше ширины запрещенной зоны, а положительное –

что больше. Это чрезвычайно удобно для развития модельных представлений процессов излучательной рекомбинации. Пример подобного изображения спектров фотолюминесценции фосфида галлия находим в работе [8]. Там же все спектры нормализованы по интенсивности при энергии в максимуме излучения.

Мы изучали фотолюминесценцию дырочного арсенида галлия, легированного цинком до концентраций порядка 10^{23} м^{-3} в области абсолютных температур от 77K до 400K . Спектры в координатах энергия фотона $h\nu$ – плотность потока фотонов Φ показаны на рис. 4, а. Интенсивности были нормализованы при энергиях в максимуме излучения. Из рассмотрения спектров видно, что при повышении температуры максимум излучения сдвигается к меньшим энергиям, а полуширина спектральной полосы увеличивается. К тому же изменяется общая конфигурация спектра. Более широких выводов сразу сделать нельзя.

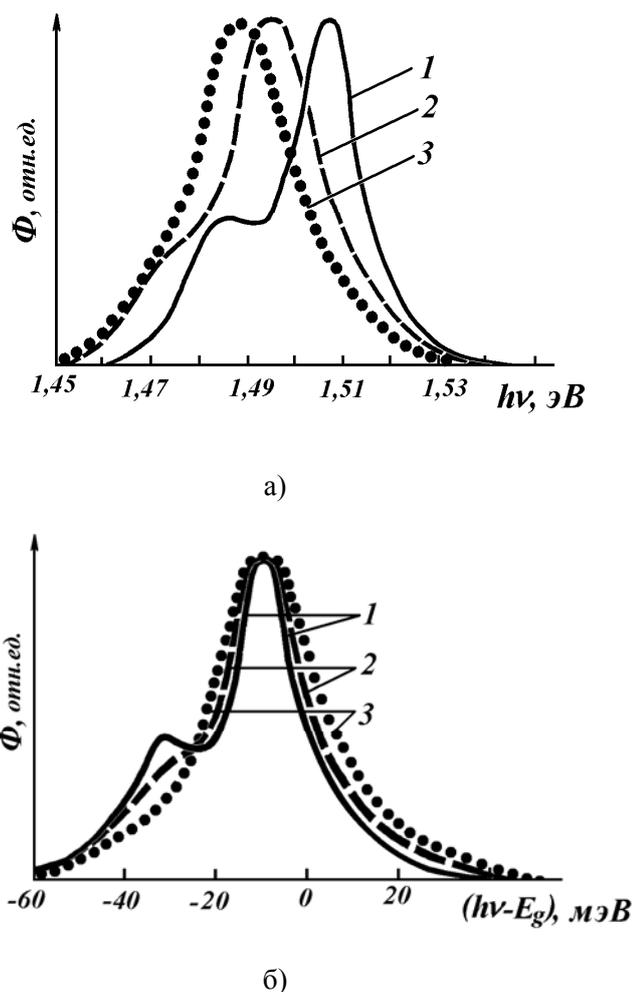


Рисунок 4 – Спектры фотолюминесценции для p-GaAs при различных температурах (1 – 77K ; 2 – 112K ; 3 – 176K): а) обычная спектральная координата; б) спектральная координата, отвлеченная от температурной зависимости ширины запрещенной зоны

На рис. 4, б показаны те же спектры, что и на рис. 4, а, но в другой спектральной координате $h\nu - E_g$, показывающей дефицит энергии относительно ширины запрещенной зоны. Картина разительно отличается от предыдущей. Постоянство энергии в максимуме фотолюминесценции относительно ширины запрещенной зоны в обеих спектральных полосах говорит о неизменности механизмов рекомбинации для каждой из полос во всем рассматриваемом диапазоне температур. Разница между шириной запрещенной зоны и энергией в максимуме первой полосы равна энергии активации остаточных доноров в арсениде галлия, а для меньшей полосы – энергии активации акцептора цинка [9]. Это позволяет сделать вывод о том, что первая полоса генерируется при

излучательных переходах донор – валентная зона, а вторая полоса – при излучательных переходах донор-акцептор.

Таким образом, при исследовательских работах в области оптоэлектроники представление спектров в координатах плотность потока фотонов (постоянная плотность потока фотонов) – разность энергии фотона и ширины запрещенной зоны исследуемого полупроводника является наиболее удобным для анализа физических моделей процессов.

Литература

1. *Гейг С., Эванс Д., Ходапп М., Соренсен Х.* Применение оптоэлектронных приборов: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1981. – 344 с.: ил.
2. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: Справочник / *А.И. Баюков, А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев* и др. / Под общ. ред. Горюнова Н.Н. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 744 с.: ил.
3. *Коган Л.М.* Полупроводниковые светоизлучающие диоды. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 208 с.
4. *Викулин И.М., Горбачёв В.Э., Коробицын Б.В.* Электролюминесценция в асимметричных р-п-структурах. // Наукові Праці УДАЗ ім. О.С. Попова. – Одеса, 2000. – С. 8 - 11.
5. Рекомбинационное излучение арсенида галлия / *Д.Н. Наследов, А.А. Рогачев, С.М. Рывкин, Б.В. Царенков* // ФТТ, – 1962. – Т. 4. – Вып. 4. – С. 1062 - 1064.
6. Гореленок А.Т., Царенков Б.Г., Чиabriшвили Н.Г. Температурная зависимость краевой фотолюминесценции n-GaAs // ФТТ. – 1970. – Т. 4. – Вып. 11. – С.1064 - 1069.
7. Мосс Т., Баррел Г., Эллис Б. Полупроводниковая оптоэлектроника: Пер. с англ. – М.: Мир, 1976. – 428 с.: ил.
8. *Vachrach R.Z., Jayson J. S.* Is free-to-band recombination important in GaP:ZnO at 300 K // *Phys. Rev.* – 1973. – В. 7. – Р. 2540 - 2544.
9. Арсенид галлия. Получение, свойства и применение. – М.: Наука, 1973. – 472 с.: ил.