

Если согласно [4] предположить, что такие температурные изменения спектров связаны с переходом молекул красителя из одной формы в другую и определить значение энергии активации перехода для родамина 6Ж в этаноле, то получается величина 800 см^{-1} , что близко к значению 1000 см^{-1} , полученному в [4]. Однако следует заметить, что при изучении температурных изменений спектров поглощения необходимо учитывать изменение плотности исследуемых растворов, которое для некоторых растворителей может достигать значительной величины и приводить к кажущемуся изменению величины интегрального поглощения.

Данные об изменении интегральной поглощательной способности изученных растворов приведены в таблице, где

$$A = \int_0^{\infty} \alpha(\nu, t) d\nu / \int_0^{\infty} \alpha(\nu)_{t=+20^\circ\text{C}} d\nu$$

имеет смысл величины интегрального поглощения, приведенного к его величине при температуре $+20^\circ\text{C}$ без учета объемного эффекта, B — та же величина с учетом объемного расширения растворителя. Из таблицы видно, что при учете температурного расширения исследованных растворов интегральное поглощение в пределах ошибок опыта ($\sim 3\%$) остается постоянным.

Таким образом, установлена независимость интегрального поглощения от температуры, что находится в согласии с теоретическими результатами работы [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Левшин В. Л. Журн. физ. химии, 1935, 6, № 8, с. 991. [2] Баранова Е. Г., Левшин В. Л. Изв. АН СССР, сер. физ., 1963, 27, № 4, с. 554. [3] Hevesi J., Kozma L. Acta Phys. Acad. Sci. Hung., 1966, 20, p. 351. [4] Аристов П. В., Викторова Е. Н. Изв. АН СССР, сер. физ., 1970, 34, № 3, с. 645. [5] Мазуренко Ю. Т. и др. Опт. и спектр., 1978, 44, № 3, с. 466. [6] Лубченко А. Ф. Квантовые переходы в примесных центрах твердых тел. Киев, 1978, с. 91, 103.

Поступила в редакцию
13.04.81

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1983, Т. 24, № 3

УДК 621.385.833

ОБ АНОМАЛЬНОЙ КИНЕТИКЕ КАТОДОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В GaN:Zn

Г. В. Сапарин, С. К. Обыден, И. Ф. Четверикова*, М. В. Чукичев, С. И. Попов
(кафедра электроники)

Оптические и люминесцентные свойства i — n -структур на основе нитрида галлия, легированного цинком, представляют научный и практический интерес [1—7]. В настоящей работе исследовались катодолюминесцентные (КЛ) свойства i — n -структур нитрида галлия, выращенных методом газовой эпитаксии на подложках сапфира с ориентацией (0001). Концентрация носителей в n -слое оценивалась в 10^{19} см^{-3} , концентрация цинка в i -слое — 10^{20} см^{-3} . Исследования проводились при комнатной температуре в растровом электронном микроскопе при энергиях электронов в зонде до 20 кэВ, токах от 0,45 до 10 нА и

* Московский авиационный технологический институт.

диаметре зонда около 0,1 мкм. В различные моменты времени при одинаковых условиях облучения снимались КЛ-спектры.

При описании кинетики люминесценции обычно имеют в виду динамику разгорания и затухания процесса при импульсном возбуждении материала [3], причем длительность этих импульсов не превышает, как правило, единиц микросекунд. И очень мало работ, в которых рассматривается кинетика люминесцентных процессов секундного и минутного диапазонов при непрерывном и постоянном возбуждении. Кроме того, подавляющее число экспериментов, использующих принцип катодолюминесценции (электронно-лучевые трубки, лазерные системы с электронно-лучевой на-

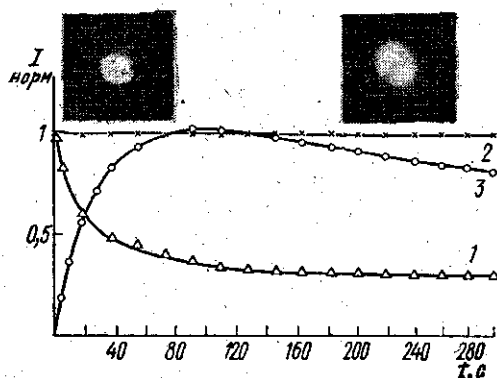


Рис. 1. Кинетика катодолюминесценции CdS (1), ZnO (2), GaN:Zn (3) в первые 5 мин при непрерывном возбуждении кристаллов неподвижным электронным лучом с энергией 20 кэВ и плотностью тока около 100 А/см²

качкой и т. д.), проводится при плотностях тока возбуждения, не превышающих 10—20 А/см².

Мы вышли за эти пределы и исследовали сравнительную долговременную кинетику люминесценции для трех материалов: GaN:Zn, CdS и ZnO — при плотностях возбуждающих потоков электронов в диапазоне 20—200 А/см² и энергии 20 кэВ. Анализировалась динамика интенсивности КЛ-излучения в течение времени экспозиции до

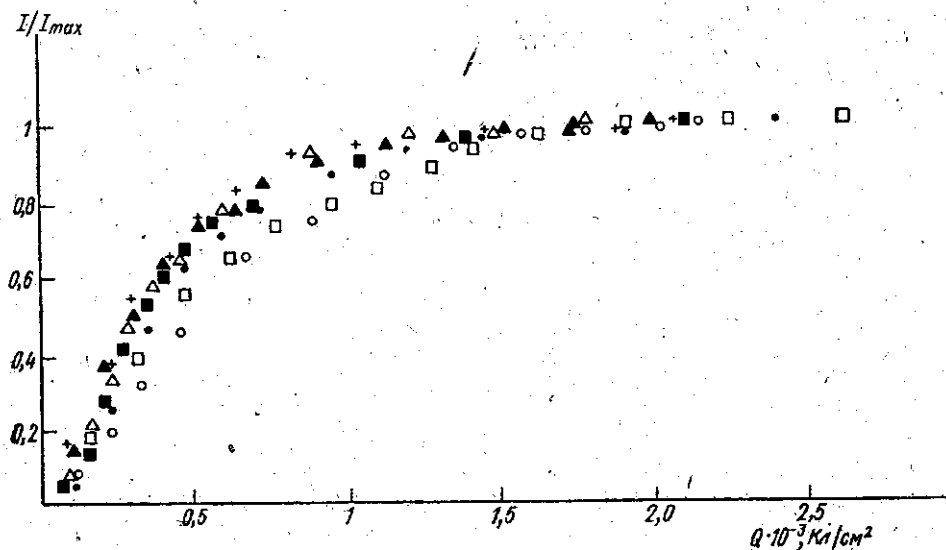


Рис. 2. Зависимость относительного изменения катодолюминесцентного сигнала от вносимого заряда для GaN:Zn

5 мин, когда возбуждающий электронный поток не смещался и непрерывно с постоянной энергией воздействовал на поверхность монокристалла. Электроны пучка при этом проникают в объем на глубину до 1,5 мкм.

На рис. 1 представлена обнаруженная нами динамика люминесценции i - n -структуры GaN:Zn (приводятся нормированные зависимости $I(t)$). При включении возбуждающего пучка интенсивность КЛ за время, не превышающее 1 мкс, достигает некоторого значения I_0 , далее в течение времени $\Delta t \approx 80$ с возрастает до максимума ($I_{\text{макс}} \approx 100 I_0$) и при дальнейшем облучении монотонно спадает. При импульсном возбуждении с длительностью импульса 1 мкс КЛ-отклик имеет классическую форму с временами разгорания и затухания не более 1 мкс, амплитуда же его в активированном пятне увеличивается в соответствии с кривой 3 рис. 1.

Для долговременного интервала и приведенных условий эксперимента большинство полупроводниковых материалов характеризуется КЛ-свечением, затухающим со временем ($dl/dt < 0$) в связи с деградацией материала под действием электронного пучка. Это демонстрирует

рис. 1, где показана динамика излучения CdS (кривая 1). При включении возбуждающего луча интенсивность КЛ-излучения практически сразу достигает максимального значения и далее монотонно падает. Для радиационно-стойких материалов, каким является, в частности, ZnO, характерно КЛ-свечение с практически постоянной интенсивностью ($dl/dt = 0$, см. рис. 1, кривая 2). Кинетика КЛ GaN:Zn в сравнении с CdS и ZnO выглядит явно необычной. Описанный ход кривой принципиально сохраняется для широкого интервала возбуждающих токов. Происходит только изменение значений I_0 , $I_{\text{макс}}$ и величины dl/dt .

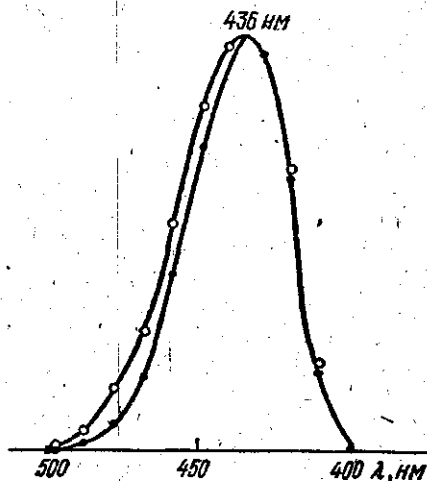


Рис. 3. Приведенные спектры GaN:Zn на участке $dl/dt > 0$ (○) и $dl/dt < 0$ (●), $\Delta h\omega = 300$ мэВ

Экспериментальные значения КЛ-интенсивности для GaN:Zn при

токах 0,45; 0,6; 0,8; 1,4; 2,4; 4,2; 6,5 нА пронормированы и нанесены разными значками на рис. 2 в зависимости от дозы облучения для участка $dl/dt > 0$. Все кривые совпали в пределах ошибок измерений, из чего следует, что скорость роста интенсивности КЛ зависит от плотности тока в электронном пучке, а максимум интенсивности излучения достигается при одной и той же дозе $Q \approx 2 \cdot 10^3$ Кл/см². При дальнейшем увеличении дозы начинается монотонный спад интенсивности. Были сделаны снимки светящегося КЛ-пятна на участках кривой $I(t)$, соответствующих нарастанию интенсивности (до 80 с) и при дальнейшем спаде последней (см. рис. 1). Эти снимки показывают, что излучающее пятно достигает размера 0,5–3 мкм при диаметре электронного зонда 0,08–0,10 мкм. С течением времени светящееся пятно деформируется: увеличивается его диаметр и пятно трансформируется в кольцо со значительным спадом интегральной интенсивности излучения и интенсивности в центральной части. Во время нарастания и спада интенсивности снимался спектр КЛ-излучения. Рис. 3 демонстрирует приведенное спектральное распределение излучения. Максимум эффективной синей полосы соответствует энергии 2,87 эВ с полушириной $\Delta h\omega = 0,3$ эВ. Необходимо отметить, что со временем происходит незначительное сужение полосы на $\Delta h\omega \approx 0,014$ эВ.

На основе описанных выше экспериментальных результатов, показавших аномальный ход долговременной кинетики КЛ для нитрида галлия, легированного цинком, можно предположить следующее. При высоких плотностях возбуждающего тока происходят сильный локальный нагрев материала и возникновение высокого градиента температуры, что приводит к стимуляции диффузии примесей, генерации и миграции собственных дефектов решетки V_{Ga} ; V_N ; Ga_i ; N_i . Помимо этого в области рассеяния электронов пучка и ионизации атомов вещества возможно появление высокой плотности заряда и существование значительного градиента локального потенциала, также способствующего диффузии носителей заряда. Наблюдаемое возрастание интенсивности КЛ (см. рис. 1, участок $dl/dt > 0$), по-видимому, связано с увеличением концентрации центров излучательной рекомбинации за счет диффузии цинка, входящего в процессе роста эпитаксиального слоя в основном в межкустальные границы. Природа этих центров в настоящее время не ясна, однако возможно; что локальный нагрев способствует переходу цинка из межкустальных границ в кристаллическую решетку GaN. Внедряясь в вакансии галлия, атомы цинка действуют как эффективные центры излучательной рекомбинации. Насыщение роста интенсивности КЛ и дальнейший монотонный ее спад можно объяснить конечной концентрацией цинка в области температурного градиента. При дальнейшем облучении материала происходит ослабление люминесценции вследствие накопления центров безызлучательной рекомбинации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Демченко А. М., Кесаманлы Ф. П. В кн.: Полупроводниковая техника и микроэлектроника. Киев, 1976, вып. 23, с. 9. [2] Marasina L. A., Pikh-tin A. N., Pichugin I. G., Solomonov A. V. Phys. stat. sol. (a), 1976, 38, p. 753. [3] Малиновский В. В., Пихтин А. Н., Соломонов А. В. ФТП, 1980, 14, с. 1550. [4] Monemar B., Lagerstedt O., Gislason H. P. J. Appl. Phys., 1980, 51, p. 625. [5] Панков Дж., Миллер Е. А., Беркхайзер Дж. Е. Изв. АН СССР, сер. физ., 1973, 37, с. 556. [6] Jacob G., Boulou M., Bois D. J. Luminesc., 1978, 17, p. 263. [7] Андреев В. М. и др. В кн.: Синтез и рост совершенных кристаллов и пленок полупроводников. Новосибирск: Наука, 1981, с. 99, 124.

Поступила в редакцию
03.05.82

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ, 1983, Т. 24, № 3

УДК 530.12;531.18

ОБОБЩЕННОЕ УРАВНЕНИЕ КЛЕЙНА—ГОРДОНА И ПРИНЦИП МАХА

Г. Ю. Богословский

(НИИЯФ)

Согласно идее Маха, инерциальные силы, действующие на тело, определяются распределением и относительным движением внешней материи. Поэтому инертная масса должна быть, вообще говоря, не скалярной, а тензорной величиной. Соответственно, кинетическая энергия должна зависеть не только от величины импульса, но и от его направления. Исходя из этой идеи, а также используя некоторые модельные предположения о главных значениях тензора массы, Коккони и Салпитер [1, 2] предложили ряд экспериментов по проверке принципа Маха, которые впоследствии были осуществлены (см. обзор [3]).