

КИНЕТИКА ВСПЫШКИ ЭФФЕКТА ГУДДЕНА—ПОЛЯ У КРИСТАЛЛОФОСФОРОВ ZnS-Cu

А. И. Проскура

Экспериментально изучена кинетика световой вспышки эффекта Гуддена—Поля второго рода (ЭГП-2) при высвечивании постоянным и переменным электрическими полями светосуммы, запасенной в люминофоре ZnS-Cu. Обнаружено, что интенсивность вспышки ЭГП-2 релаксирует за $\sim 10^{-2}$ с по гиперболе второго порядка. Обсуждена аналогия между вспышкой ЭГП-2 и люминесценцией при световом ударе.

Световая вспышка эффекта Гуддена—Поля (ЭГП) возникает вследствие компенсации внешним электрическим полем $\sim 10^4$ В/см коллективных энергетических барьеров, продолжительное время разделяющих неравновесные электроны и дырки, и последующей рекомбинации носителей на уровнях центров свечения [1]. Увеличение приложенного поля приводит к возрастанию числа дезактивируемых центров свечения и соответственно к росту светосуммы вспышки.

Кинетика вспышек изучалась в [2-6] без идентификации родов ЭГП. В настоящей работе исследуется кинетика вспышки ЭГП второго рода (ЭГП-2). В качестве объекта использовался поликристаллический люминофор ZnS-Cu марки ФК-106. Методика измерений и основные свойства ЭГП-2 у этого люминофора описаны в [1].

Задержка в возникновении вспышки ЭГП-2 при наложении прямоугольных импульсов напряжения бесконечной длительности была $\leq 10^{-4}$ с. Вспышка практически полностью затухала за 10^{-2} с. Интенсивность ее B спадала согласно

$$B = B_0 (1 + at)^{-2},$$

где B_0 — амплитудное значение яркости, a — постоянная, t — время, отсчитываемое от момента возникновения вспышки. Мгновенное время рекомбинации τ , определяемое как отношение интенсивности свечения к наклону касательной к кривой релаксации, линейно возрастало по своей величине от 10^{-3} до $4 \cdot 10^{-2}$ с.

В координатах $(\sqrt{B_0/B} - 1) \sim t$ экспериментальные точки укладывались вдоль отрезка прямой с тангенсом угла наклона $\operatorname{tg} \alpha = 3 \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$ (рис. 1). Идентичной зависимостью передавалась релаксация вспышки при использовании синусоидального напряжения с частотой $f = 10$ кГц. При этом с уменьшением частоты высвечивающего напряжения релаксация замедлялась, а каждый разрешаемый на экране двухлучевого электронного осциллоскопа пичок свечения был синфазен амплитудному значению приложенного к люминофору напряжения. Общий вид волн яркости свечения ЭГП-2 представлен на рис. 2.

Спрямление кривой релаксации в координатах $(\sqrt{B_0/B} - 1) \sim t$ позволяет для интерпретации результатов привлечь представления, которые были развиты при разработке метода светового удара. В полупроводниковых соединениях $A^{II}V^{VI}$ они были апробированы исследованием кинетики фотопроводимости и люминесценции при бимолекулярной рекомбинации.

Сущность метода светового удара заключается в создании интенсивным импульсным возбуждением таких условий в кристалле, что неравновесные электроны не захватываются в ловушки, которые практически полностью заполнены, а предпочтительно рекомбинируют с дырками на акцепторных уровнях [7]. Подобная ситуация может, по-видимому, иметь место и в случае ЭГП.

Действительно, предварительным возбуждением люминофора УФ радиацией обеспечивается заполнение электронных ловушек фотоносителями в областях кристаллов с низкими значениями внутреннего электрического поля, а при компенсации энергетического барьера в области пространственного заряда зеленых центров свечения ($\lambda_{\max} \sim 518$ нм) должны появляться в больших количествах свободные электроны. Оценим амплитудное значение n_0 их концентрации в области локализации вспышки.

Как известно [8], $\text{tga} = n_0 C_n$ и $C_n = S_n \langle v \rangle$, где C_n и S_n — коэффи-

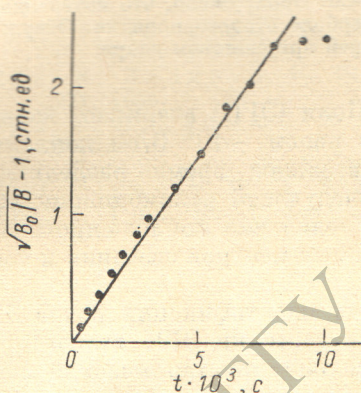


Рис. 1. Релаксация интенсивности вспышки эффекта Гуддена—Поля второго рода. Люминофор ZnS-Cu марки ФК-106 при комнатной температуре.

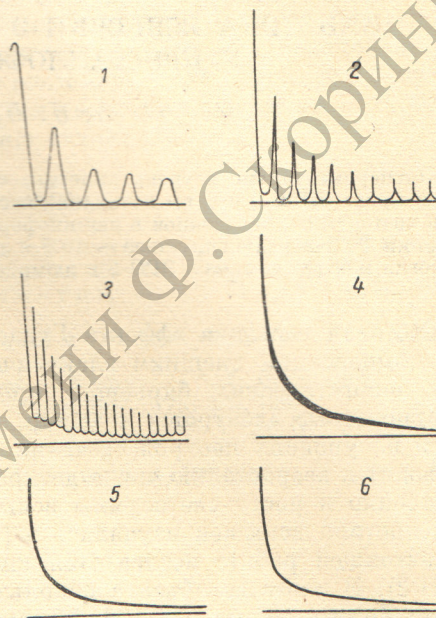


Рис. 2. Волны яркости вспышки эффекта Гуддена—Поля второго рода при высвечивании синусоидальным (1, 2, 3, 4, 5 — частоты 200, 500, 1000, 10000 и 20000 Гц соответственно) и постоянным (6) напряжением.

Длительность, развертки $\sim 10^{-2}$ с.

циент и соответственно сечение захвата электрона на центр рекомбинации, $\langle v \rangle \sim 10^7$ см/с — средняя тепловая скорость захватываемого электрона. Положив для зеленого центра сечение захвата сравнимым с определенным в работе [9] сечением захвата синим центром $S_{nr} \sim 10^{-20}$ см² и учитывая, что эта величина является характерной для сечений излучательного захвата r -центрами в монокристаллах на основе различных полупроводниковых соединений $A^{IV}B^{VI}$, получим величину $n_0 \sim 3 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Уместно отметить, что по релаксации фототока при световом ударе в керамических образцах ZnS-Cu, изготовленных из люминофора ФК-106 и также обладавших ЭГП, концентрация r -центров была найдена $\sim 10^{14}$ см⁻³ и сечение захвата электронов ими $\sim 10^{-20}$ см². Возможно, что в исходном люминофоре значения этих параметров не меньше названных величин. Для сравнения приведем значение $\sim 10^{18}$ см⁻³ концентрации примесной меди, образующей центры излучательной рекомбинации.

Величина n_0 должна характеризовать локальные условия в областях возникновения вспышки, где концентрация электронов в момент вспышки превышает значение их средней концентрации для всего объема люминесцентного кристаллика. Это предположение согласуется с утверждением авторов [10], изучавших изменение концентрации неравновесных электро-

нов при девозбуждении полем $1.5 \cdot 10^4$ В/см кристаллофосфоров ZnS и ZnCdS с типичным значением плотности электронных ловушек $\sim 10^{15}$ см $^{-3}$. По их оценкам в этих светосоставах наложение поля приводит к уменьшению концентрации электронов в глубине микрокристаллов от значения $\sim 10^{14}$ см $^{-3}$ путем смещения носителей в приповерхностные районы, где возрастает темп рекомбинации. Поскольку закон релаксации вспышки ЭГП не зависел от значения высвечивающего напряжения при изменении величины его в несколько раз, то можно допустить, что амплитудные значения концентрации n_0 в тех областях пространственного заряда, где компенсируется энергетический барьер, близки между собой. По-видимому, это связано с тем обстоятельством, что протяженность области пространственного заряда с центрами ЭГП, где возбуждение локализовано в пределах проникновения в ZnS УФ радиации ($\sim 10^{-4}$ см), много меньше той части микрокристалла, в которой концентрация электронов повышена в течение темновой паузы и чей размер сравним с размерами кристаллика ($\sim 10^{-3}$ см).

Время задержки t_3 возникновения вспышки определяется в основном временем заполнения электронами области пространственного заряда при снятии экранировки с центров свечения. Поэтому сверху оно ограничивается значением времени максвелловской релаксации, которое в высокоомном сульфиде цинка по порядку величины близко 10^{-3} с. С увеличением прилагаемого напряжения время задержки благодаря возрастанию роли дрейфа уменьшается на несколько порядков величины. Авторы [6] сообщили о значении $t_3 \sim 10^{-8}$ с.

Таким образом, результаты исследования кинетики вспышки ЭГП указывают на то, что концентрация ловушек, заполняемых в области пространственного заряда в момент вспышки, много меньше концентрации возбужденных центров свечения. Это позволяет усматривать некоторый параллелизм между вспышкой ЭГП и люминесценцией при световом ударе.

Литература

- [1] А. И. Проскура. Ж. прикл. спектр., 21, 722, 1974.
- [2] E. Krautz, Z. Naturforsch., 4a, 284, 1949.
- [3] G. Destriau, J. Mattler. J. Phys. Rad., 13, 205, 1952.
- [4] J. T. Steinberger, W. Low, E. Alexander. Phys. Rev., 99, 1217, 1955.
- [5] H. Gutjahr. Z. Phys., 168, 199, 1962.
- [6] P. Lenz, N. Riehl. Z. angew. Phys., 32, 366, 1972.
- [7] Е. А. Сальков, М. К. Шейнкман. ФТТ, 5, 397, 1968.
- [8] М. К. Шейнкман. В сб.: Электролюминесценция твердых тел. Тр. III Совещ. по электролюминесценции, 77. «Наукова думка», Киев, 1971.
- [9] И. Я. Городецкий, А. В. Любченко, А. В. Саркисов, Л. А. Сысоев, М. К. Шейнкман. Изв. АН СССР, сер. физ., 35, 1473, 1971.
- [10] H. Kallmann, B. Kramer, P. Mark. Phys. Rev., 109, 721, 1958.

Поступило в Редакцию 17 мая 1977 г.