

В. И. СЛУЕВ, Г. В. СПИВАК, Г. В. САПАРИН

НАБЛЮДЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ «ЛОВУШЕК» ПРИ ПОМОЩИ СТРОБОСКОПИЧЕСКОГО РАСТРОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО МИКРОСКОПА

В настоящем сообщении показана на ряде полупроводниковых объектов возможность наблюдения локального распределения «ловушек» и их временного катодолюминесцентного (КЛ) высвечивания при помощи стробоскопического растрового электронного микроскопа (РЭМ).

Особенность этого режима РЭМ заключается в том, что при импульсном сканировании электронным лучом выделяется желаемая фаза локального процесса с одновременным получением изображения, формируемого оптическим КЛ-сигналом. — [1, 2] решались другие задачи применения стробоскопического РЭМ в полупроводниковой электронике.

На рис. 1 даны эюры сигналов, поясняющие работу РЭМ в стробоскопическом режиме КЛ.

$I_1(t)$ импульс электронного зонда на объекте, $I_2(t)$ — импульс КЛ-высвечивания объекта, $I_3(t)$ — стробирующий импульс, сдвинутый относительно начала возбуждения на время задержки t_3 , в течение которого регистрируется сигнал, $I_4(t)$ — регистрируемая фаза КЛ-излучения элемента объекта.

С помощью стробоскопии в КЛ-режиме удается выявить области образца, у которых КЛ-высвечивание задерживается относительно начала возбуждения. По изменению контраста на изображении при увеличении времени задержки (рис. 1 можно определить время «запаздывания» КЛ-излучения из данной области объекта.

Задержку в появлении КЛ-излучения можно объяснить влиянием «ловушек», которые являются насыщающимися поглотителями.

Влияние «ловушек» на выход когерентного излучения в полупроводниковых лазерах, зависимость добротности резонатора от времени были исследованы, например, в [3, 4]. Временной сдвиг между началом когерентного излучения при импульсном возбуждении, который в некоторых случаях достигал 1 мкс, объясняется эффектом заполнения «ловушек» в активной области полупроводника. По зависимости задержки между импульсом возбуждения и началом когерентного излучения от накачки проводятся оценки концентраций «ловушек» [5]. Однако полученные таким образом значения концентраций «ловушек» являются усредненными по всему активному объекту полупроводника.

С помощью стробоскопического КЛ-режима РЭМ удается выявить распределение ловушек, оценить их концентрацию по объекту и наблюдать локальный временной ход их высвечивания.

Если время возбуждения электронным зондом много меньше времени жизни носителей, захваченных ловушками, то можно пренебречь термической активацией во время действия возбуждающего импульса (см. рис. 1). При вероятности захвата пустой «ловушкой» носителя много большей вероятности рекомбинации можно полагать, что КЛ-излучение появляется лишь тогда, когда все «ловушки» заполнены. Предположим, что имеются в объекте «ловушки» одного типа. Тогда условие полного их заполнения:

$$\tau G = KN, \quad (1)$$

где N — локальная концентрация ловушек, K — количество носителей, захваченных одной ловушкой; τ — время заполнения ловушек, G — число носителей, генерируемых в единицу времени в 1 см³.

Число носителей, генерируемое в единицу времени в единице объема, очевидно,

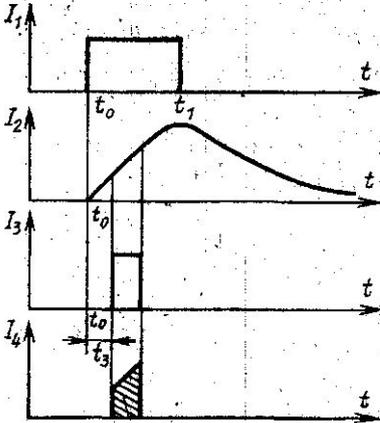


Рис. 1. Эюры сигналов, характеризующие работу РЭМ

определяется параметрами электронного зонда, энергией, необходимой для образования одной электронно-дырочной пары, а также возбуждаемым объемом:

$$G = \frac{IU}{\varepsilon V}, \quad (2)$$

где I — ток электронного пучка, U — ускоряющая разность потенциалов, V — возбужденный объем, ε — энергия образования электронно-дырочной пары, которую можно оценить [6]:

$$\varepsilon = \frac{14}{5} E_g + E', \quad (3)$$

где E_g — ширина запрещенной зоны, а E' — пропорционально целому числу оптических фононов, теряемых в этом процессе, $0,5 < E' < 1$ эВ. Значения энергии ε в зави-

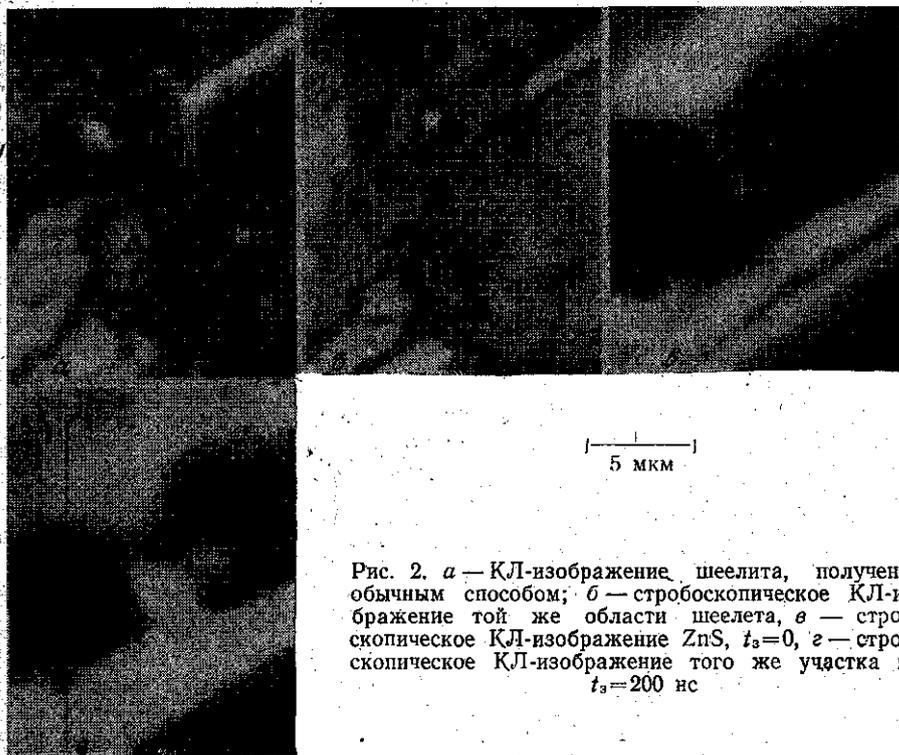


Рис. 2. *a* — КЛ-изображение шеелита, полученное обычным способом; *b* — стробоскопическое КЛ-изображение той же области шеелита, *в* — стробоскопическое КЛ-изображение ZnS, $t_s=0$, *г* — стробоскопическое КЛ-изображение того же участка при $t_s=200$ нс

симости от полупроводника обычно 1—20 эВ. Для нахождения объема V , в котором происходит генерация электронно-дырочных пар, следует либо непосредственно решать задачу рассеяния первичного электронного пучка в объекте (см. [7]), либо воспользоваться одной из моделей процессов рассеяния [8, 9, 10]. Концентрация «ловушек» из соотношения (1) с учетом (2) оценивается при принятых допущениях:

$$\dot{N} \approx \left(\frac{IU}{\varepsilon VK} \right) \tau. \quad (4)$$

Значение времени τ берется из эксперимента: при $t_s > \tau$ наблюдается появление КЛ-свечения из данной области образца. Величину K для ряда материалов, согласно [11], можно считать равной единице. Нами с помощью описанной выше методики исследовался минерал шеелит и кристаллы ZnS.

На рис. 2, *a* дано КЛ-изображение шеелита, полученного обычным способом при непрерывном сканировании, на рис. 2, *б* стробоскопическое КЛ-изображение того же участка шеелита при частоте возбуждения импульсов $f=150$ кГц, длительности им-

пульсов возбуждения $t_n=500$ нс, длительности стробирующего импульса $t_{ст}=400$ нс; время задержки $t_d=0$. Участки образца, содержащие «ловушки»; они выглядят темными, так как $t_d+t_{ст}<t$.

При $t_n=100$ нс контраст темных участков обращается, что соответствует заполнению «ловушек» и началу рекомбинации.

На основании этого можно считать $\tau=400$ нс. В условиях данного эксперимента значение тока электронного зонда $I=10^{-7}$ А, ускоряющая разность потенциалов $U=20$ кэВ, энергия образования одной электронно-дырочной пары $\mathcal{E}=20$ эВ. Если $V=4/3 \pi R^3$ ($R=2 \cdot 10^{-4}$ см), а $K=1$, то из (4) получаем ожидаемую по порядку величину оценки концентрации ловушек $6 \cdot 10^{-18}$ см $^{-3}$. По-видимому, с помощью стробоскопии удастся выявить распределение в минерале одинаковых фаз, отложенных в различные геологические времена. Отличие фаз обусловлено содержанием в одной из них ловушек.

Та же методика была применена к изучению распределения ловушек в кристалле ZnS. На рис. 2, в дано стробоскопическое КЛ-изображение ZnS при $t_n=0$, $t_{ст}=300$ нс, $t_{доз}=500$ нс (начальный этап разгорания).

На рис. 2, г те же условия наблюдения, но при $t_n=200$ нс. На рис. 2, в видны темные полосы, которые обусловлены «ловушками»; высветивание с этих областей происходит через 200 нс после возбуждения, что видно на рис. 2, г.

Описанная методика расширяет возможности исследования полупроводниковых материалов с помощью РЭМ. Она является полезной при локальном микроанализе, при изучении распределения «ловушек», влияющих на кинетику КЛ-излучения, и их временных характеристик в лазерных полупроводниковых материалах.

Авторы выражают глубокую признательность О. В. Кононову и И. В. Нестерову за обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Antoshin M. C., Spivak G. V., Yunovich A. E. — Septieme congres de microscopie electronique. Grenoble, 1970, p. 251.
2. Спивак Г. В., Комолова Л. Ф., Слугев В. И., Сапарин Г. В., Антошин М. К. — «Письма в ЖЭТФ», 21, 38, 1975.
3. Aspens D. E., Frova A. — «Solid State Comm.» 7, 155, 1969.
4. Frova A., Aspues D. E. — «Phys. Rev.», 182, 795, 1969.
5. Hamakawa Y., Handler P., German F. A. — «Phys. Rev.», 167, 709, 1968.
6. Klein C. A. — «Appl. Phys.», 39, 2029, 1968.
7. Lewis H. W. — «Phys. Rev.», 78, 526, 1950.
8. Kyser D. F., Wittry D. B. — The electron microprobe ed by T. D. Mockinlay et. al, 1966, p. 691.
9. Archard G. D. — «J. Appl. Phys.», 32, 1505, 1961.
10. Ehrenberg W., King D. E. N. — «Proc. Phys. Soc.», 751, 1963.
11. Панков Ж. Оптические процессы в полупроводниках. М., 1973, стр. 403.

Поступила в редакцию
17.11 1975 г.

Кафедра
электроники

УДК 538.245 : 538.56.029.6

С. А. КИРОВ, А. И. ПИЛЬЩИКОВ

СПЕКТРЫ МАГНИТОСТАТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ФЕРРИТОВ С ДОМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Экспериментальное и теоретическое изучение спектров магнитостатических колебаний в монокристаллических образцах ферритов показало [1, 2], что в случае существования регулярной доменной структуры в них возможны неоднородные колебания усредненной по доменной структуре намагниченности, аналогичные уокеровским колебаниям в области насыщения [3]. В работах [1, 2] был рассмотрен случай сферического образца монокристалла кубической симметрии (первая константа магнитной анизотропии $K_1 < 0$), намагничиваемого вдоль оси [110] и обладающего пластинчатой магнитодвухфазной доменной структурой. Проведенные в [4, 5] исследования спектров однородных доменных колебаний показали, что при намагничивании вдоль