

## Дрейфовая подвижность фотогенерированных носителей заряда в кристаллах $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$

© С.Н. Пляка, Г.Х. Соколянский

Днепропетровский государственный университет,  
320625 Днепропетровск, Украина

(Поступила в Редакцию 14 мая 1998 г.)

Экспериментально исследована дрейфовая подвижность фотогенерированных электронов и дырок в кристаллах  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  с различной степенью легирования.

Исследованию подвижности фотогенерированных носителей заряда в силленитах германия и кремния с использованием времяпролетной методики посвящен ряд работ [1–4]. В работах [5–7] перенос заряда исследуется методом прямого измерения распределения напряженности электрического поля с помощью поперечного электрооптического эффекта. Наблюдается очень широкий спектр ее значений: от  $10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  в образцах с пустыми ловушками [2] до величины  $\geq 10 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ , полученных в [3] с помощью техники с высоким временным разрешением при зона-зонной генерации. В большинстве исследований изучался перенос электронов. В настоящей работе сообщается о некоторых результатах измерений подвижности фотогенерированных электронов и дырок в кристаллах  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ , как номинально чистых, так и легированных ионами ванадия.

Исследования выполнены на кристаллах, выращенных методом Чохральского. Легирование проводилось введением в шихту  $\text{V}_2\text{O}_5$  в количестве 0,2, 0,5 и 1 mol.%. Подвижность измерялась как с помощью метода стационарных токов, ограниченных объемным зарядом (ТООЗ), так и с применением времяпролетной методики (ВП). Использовались образцы в виде плоскопараллельных пластин толщиной  $d \leq 1 \text{ mm}$ . При ТООЗ-измерениях отполированный торец образца освещался светом с длиной волны  $\lambda = 400 \text{ nm}$ , интенсивностью  $\sim 10 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ . При ВП-исследованиях использовались одиночные импульсы света от лампы ИСП-400, прошедшие через стеклянный светофильтр с максимумом пропускания при  $h\nu \approx 3.4 \text{ eV}$ , что близко к значению ширины запрещенной зоны  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$ .

Для получения воспроизводимого сигнала при ВП-измерениях образец предварительно выдерживался в темноте с закороченными электродами в течение 5 min, а измерительное поле прикладывалось не более чем на 1 min. В таком случае заметное изменение сигнала фотопереноса прекращалось после освещения образца несколькими вспышками. При измерении вольт-амперных характеристик (ВАХ) каждая экспериментальная точка записывалась через 600 s после включения света, когда устанавливалось стационарное значение фототока. За это время в объеме образца образуется неоднородное распределение поля [6,7]. Таким образом, в обоих случаях производились измерения в состоянии кристалла с заполненными ловушками.

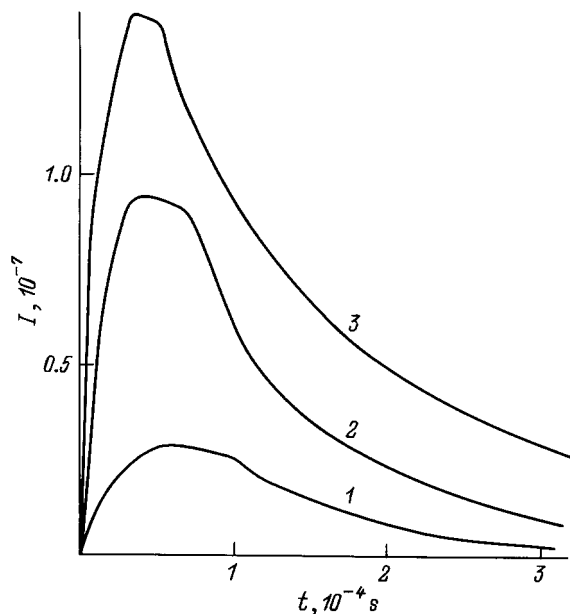
Анализ ВАХ показывает [8,9], что как в случае монополярной, так и при двойной инжекции (ДИ) может наблюдаться квадратичный участок зависимости тока от напряжения, описываемый формулой

$$j = \frac{9}{8} \varepsilon \mu_{\text{ef}} \frac{U^2}{d^3}, \quad (1)$$

где  $d$  — толщина образца,  $\mu_{\text{ef}}$  — эффективная подвижность носителей. В случае ДИ при близких значениях подвижности электронов и дырок  $\mu_{\text{ef}}$  характеризует амбиполярный дрейф. На экспериментальных ВАХ, снятых при однородном освещении, после участка довольно резкого нарастания наблюдается квадратичная зависимость тока от напряжения. Определенные с применением соотношения (1) значения подвижности составляют величину  $\mu \geq 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  (см. таблицу).

Значения параметров фотопереноса в  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$

Образец	$\mu, 10^{-3} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$\mu_n, \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$\tau_n, 10^{-4} \text{ s}$	$E_{\mu n}, \text{ eV}$	$\mu_p, \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	$\tau_p, 10^{-4} \text{ s}$	$E_{\mu p}, \text{ eV}$
BGO	1	$3.6 \cdot 10^{-2}$	6.5	0.32	$1.1 \cdot 10^{-2}$	4.5	0.52
BGO + 0.2 mol. % $\text{V}_2\text{O}_5$	6.8	$1.37 \cdot 10^{-1}$	1.8	0.2	$1.95 \cdot 10^{-1}$	1.94	0.2
BGO + 0.5 mol. % $\text{V}_2\text{O}_5$	1.5	$6.97 \cdot 10^{-2}$	1.55	0.31	$1.12 \cdot 10^{-1}$	1.8	0.29
BGO + 1 mol. % $\text{V}_2\text{O}_5$	1.2	$4 \cdot 10^{-2}$	1	0.36	$9 \cdot 10^{-2}$	1.3	0.32



Временная зависимость фототока в кристалле  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20} + 1 \text{ mol.}\% \text{V}_2\text{O}_5$  при напряжениях (в В): 1 — 300, 2 — 500, 3 — 600 (температура  $60^\circ\text{C}$ ).

При ВП-исследованиях получены сигналы как гауссовского, так и дисперсионного переноса [10]. Последний наблюдался в чистом  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  при температуре выше  $60^\circ\text{C}$ . В кристаллах с ванадием при температурах ниже  $80^\circ\text{C}$  перенос гауссовский. На полученных импульсах (см. рисунок) можно выделить два участка спада фототока. За время пролета  $T_n$  нами принималось время окончания более пологого участка. График  $T_n^{-1} = f(U)$  представляет собой прямую линию, что свидетельствует о независимости подвижности от поля. На втором участке спадание сигнала  $I(t)$  экспоненциальное. Это позволяет определить время жизни фотогенерированных носителей заряда. В случае дисперсионного переноса время  $T_n$  определялось по излому графика  $\lg I - \lg t$ . Значения подвижности, определенные из сигналов обоих типов, ложатся на одну прямую на графике  $\mu(T)$ , построенном в координатах Аррениуса.

На всех исследованных образцах получены сигналы переноса как фотогенерированных электронов, так и дырок. Значения подвижности и времени жизни электронов ( $\mu_n, \tau_n$ ) и дырок ( $\mu_p, \tau_p$ ) приведены в таблице. В легированном  $\text{Bi}_{12}\text{GeO}_{20}$  произведение  $\mu\tau$  для электронов несколько выше, чем для дырок, оставляя близким по порядку величины для обоих типов носителей. Значения  $\mu_n$  и  $\tau_n$  хорошо согласуются с литературными данными, полученными на образцах с заполненными ловушками [1,2,4]. Введение ванадия приводит к выполнению обратного соотношения  $(\mu\tau)_p > (\mu\tau)_n$ . Во всех случаях отличие между  $(\mu\tau)_n$  и  $(\mu\tau)_p$  не превышает одного порядка. С ростом концентрации ванадия значения подвижности и времени жизни как электронов, так и дырок уменьшаются. С увеличением температуры подвижность

фотогенерированных носителей заряда возрастает экспоненциально с энергией активации  $E_{\mu n}$  и  $E_{\mu p}$ .

Тот факт, что полученные из анализа ВАХ величины подвижности  $\mu$  для всех кристаллов меньше, чем определенные по ВП-методике значения  $\mu_n$  и  $\mu_p$ , может свидетельствовать о том, что при однородном освещении в образце перемещаются одновременно и электроны, и дырки. При этом  $\mu$  имеет смысл амбиполярной дрейфовой подвижности [11]. Значения подвижности порядка  $10^{-1} - 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  характерны для прыжковой проводимости в хвостах плотности состояний [12]. Это согласуется с наличием в кристаллах силленитов хорошо развитого плеча оптического поглощения [13].

## Список литературы

- [1] S.L. Hou, R.B. Lauer, R.E. Aldrich. *J. Appl. Phys.* **44**, 6, 2652 (1973).
- [2] В.Х. Костюк, А.Ю. Кудзин, Г.Х. Соколянский. *ФТТ* **22**, 8, 2454 (1980).
- [3] И.Т. Овчинников, Э.В. Яншин. *ФТТ* **25**, 7, 2196 (1983).
- [4] A. Ennouri, M. Tapiero, J.P. Vols, J.P. Zielinger, J.Y. Moisan, J.C. Launay. *J. Appl. Phys.* **74**, 4, 2180 (1993).
- [5] В.Н. Астратов, А.В. Ильинский, В.А. Киселев, М.Б. Мельников. *ФТТ* **26**, 3, 743 (1984).
- [6] В.Н. Астратов, А.В. Ильинский, М.Б. Мельников. *ФТТ* **25**, 10, 3042 (1983).
- [7] В.В. Брыксин, Л.И. Коровин, В.И. Марахонов. *ЖТФ* **53**, 6, 1133 (1983).
- [8] М. Ламперт, П. Марк. Инжекционные токи в твердых телах. Мир, М. (1973). 416 с.
- [9] К. Као, В. Хуанг. Перенос электронов в твердых телах. Мир, М. (1984). 219 с.
- [10] В.И. Архипов, А.И. Руденко, А.М. Андриеш, М.С. Иову, С.Д. Шутов. Нестационарные инжекционные токи в твердых телах. Штиинца, Кишинев (1983). 175 с.
- [11] Р. Смит. Полупроводники. Мир, М. (1982). 560 с.
- [12] Аморфные полупроводники / Под ред. М. Бродского. Мир, М. (1982). 420 с.
- [13] R.E. Aldrich, S.I. Hou, M.L. Marvill. *J. Appl. Phys.* **42**, 493 (1971).