

## ВЛИЯНИЕ РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРОВ РЕКОМБИНАЦИИ В КРИСТАЛЛАХ p-Ge ДЛЯ ДЕТЕКТОРОВ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В.Ю.Явид, С.Н.Якубеня, А.Р.Челядинский

*Белорусский государственный университет, 220050, г. Минск, пр. Ф.Скорины, 4*

*e-mail: heii@phys.bsu.unibel.by*

Изучены профили радиального распределения времени жизни неравновесных носителей заряда  $\tau$  в кристаллах детекторного германия p-типа проводимости, выращенного по методу Чохральского в присутствии гадолиния. Установлено, что введение в расплав гадолиния приводит к выравниванию значений  $\tau$  по диаметру кристалла. Показано, что гадолиний в расплаве подавляет образование макроскопических неоднородностей, связанных со структурой течения расплава, вызванного тепловой гравитационной конвекцией. Определено энергетическое положение рекомбинационных центров в запрещенной зоне. Установлено, что легирование германия гадолинием не приводит к образованию новых центров рекомбинации.

### Введение

Отличительное свойство примесей редкоземельных элементов (РЗЭ) в полупроводниковых кристаллах, полученных из расплава, состоит в том, что, являясь электрически неактивными, они способны влиять на процессы дефектно-примесного взаимодействия. Так, например, установлено, что высокая эффективность взаимодействия введенного в расплав неодима с фоновыми технологическими примесями увеличивает степень очистки кристаллов германия. Полученное таким образом снижение концентрации рекомбинационно-активных центров позволяет увеличить время жизни неосновных носителей заряда в 2.5-3.5 раза и уменьшить величину их коэффициента прилипания при 77 К более чем на порядок [1,2]. Однако для того чтобы получить на основе германия детекторы ионизирующих излучений с высокими эксплуатационными характеристиками кроме низкого содержания рекомбинационных центров необходимо и их равномерное распределение по кристаллу.

Имеющиеся в настоящее время данные о влиянии, введенных в расплав РЗЭ на равномерность распределения примесных центров, включая рекомбинационно-активные, в полупроводниковых кристаллах малочисленны и неоднозначны [3,4].

Цель настоящей работы – установить влияние гадолиния в расплаве на формирование структуры радиального распределения рекомбинационных центров в монокристаллах детекторного германия.

### Основная часть

В работе исследовались профили радиального распределения времени жизни неравновесных носителей заряда. Измерения проводились на кристаллах германия, выращенных методом Чохральского в присутствии редко-земельного элемента гадолиния и без него. Содержание Gd в расплаве варьировалось от  $3 \times 10^{-4}$  до  $8 \times 10^{-2}$  мас. %. Кристаллы легировались галлием и имели концентрацию дырок  $(1 - 2) \times 10^{14} \text{ см}^{-3}$ . Плотность дислокаций составляла  $8 \times 10^2 - 3 \times 10^3 \text{ см}^{-2}$ .

Величина времени жизни для различных слитков вне зависимости от присутствия гадолиния находилась в диапазоне 750 - 900 мкс при комнатной температуре. Значение  $\tau$  определялось методом фазового детектирования сигнала фотопроводимости при комнатной температуре [5,6].

На рис. 1 приведены профили радиального распределения времени жизни для двух пластин, вырезанных из средней части слитков германия, выращенного в присутствии гадолиния и без него. Видно, что распределения  $\tau$  сильно отличаются как по форме, так и по величине среднего квадратичного отклонения времени жизни  $\sigma$ . Для Ge<Ga>  $\sigma = 0.291$ , а Ge<Ga,Gd>  $\sigma = 0.081$ .

С целью выявления скрытых периодичностей в распределении времени жизни неравновесных носителей заряда по диаметру слитка и определения их размеров был реализован классический аппарат спектрального анализа, использующий быстрое преобразование Фурье. На рис. 2 приведены спектры мощности Фурье для образцов, радиальные распределения которых приведены на рис. 1. Анализ спектров Фурье исследованных образцов позволил выделить три независимых линии с волновыми числами  $k_0$ ,  $k_1$  и  $k_2$ . Для Ge, выращенного без гадолиния, спектр Фурье кроме этих трех линий содержит их суперпозиции  $k_0-k_1$ ,  $k_0+k_1$ ,  $2k_0-k_2$  и Фурье-компоненты линии  $k_0$ :  $1/2k_0$ ,  $3/2k_0$ . Спектр Фурье для образца из слитка Ge<Ga,Gd> по сравнению с образцом без гадолиния имеет следующие особенности: отсутствие линии  $k_2$  и линий связанных с суперпозициями  $k_1$ ,  $k_2$  и  $k_0$ ; мощность линии  $k_0$  приблизительно на порядок выше; наличие более развитой структуры Фурье-компонент линии  $k_0 - 1/8k_0$ ,  $1/2k_0$ ,  $3/4k_0$ ,  $11/8k_0$ ,  $3/2k_0$ ,  $7/4k_0$ . Таким образом, все многообразие различных квазипериодических радиальных распределений  $\tau$  (а, следовательно, и концентрации рекомбинационных центров) для обоих исследованных кристаллов может быть описано так же, как и в особо чистом германии [7] с помощью нескольких периодических функций с различными волновыми числами.

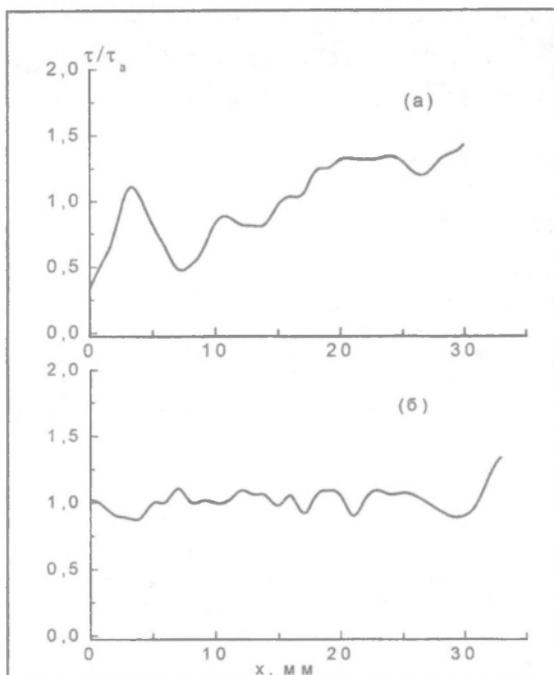


Рис. 1. Профили радиального распределения относительного времени жизни неравновесных носителей заряда  $\tau/\tau_a$ .  $\tau_a$  - среднее время жизни по пластине при комнатной температуре. (а) – Ge<Ga>,  $\tau_a = 820$  мкс; (б) – Ge<Ga,Gd>,  $\tau_a = 795$  мкс, содержание в расплаве Gd  $4 \times 10^{-2}$  мас. %.

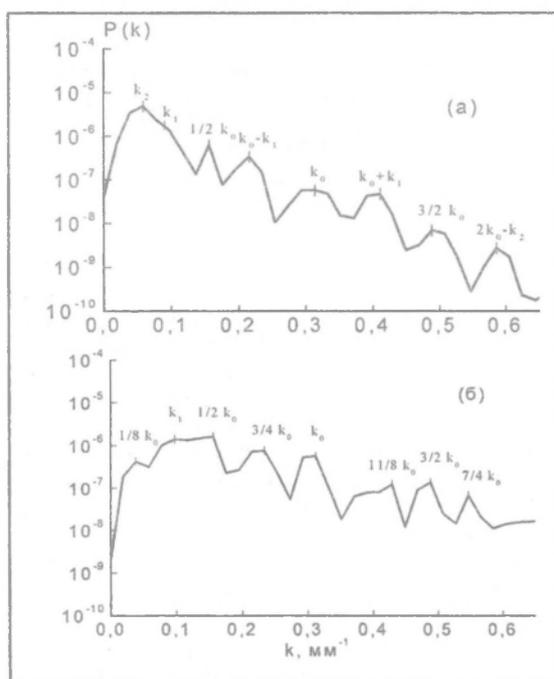


Рис. 2. Спектры мощности Фурье радиальных распределений времени жизни, представленных на рис. 1.

В большинстве случаев выращивания кристаллов основные причины примесной или дефектно-примесной неоднородности связаны с колебаниями температуры в расплаве, обуслов-

ленными характером его перемешивания, и асимметрией теплового поля у фронта кристаллизации вращающегося слитка [8]. Колебания температуры вызывают осцилляции скорости роста кристалла, а, следовательно, и эффективного коэффициента сегрегации. При выращивании кристаллов по методу Чохральского оба эти процесса связаны с гравитационной конвекцией в расплаве. Конвективная неустойчивость расплава, приводящая к формированию пространственно-временной структуры у фронта кристаллизации, обычно развивается по сценарию Фейгенбаума через бифуркации удвоения периода [8,9]. Бифуркации возникают при определенном значении числа Релея Ra [8]. Развитие "дерева бифуркаций" ведет к турбулентности [10,11]. Этот переход в настоящее время в основном изучен по временной динамике конвективных потоков. Но турбулентность не может быть описана только временной динамикой. Пространственная и временная последовательность бифуркаций скорее всего зацеплены друг с другом. Однако то, как это происходит, остается пока неясным [11]. Серии линий, связанные с Фурье-компонентами линии с волновым числом  $k_0$ , в спектрах мощности на рис. 2 как раз и описывают переход к турбулентности посредством последовательности бифуркаций.

Введение в расплав гадолиния, как следует из рис. 2, приводит к развитию "дерева бифуркаций". Можно предположить, что причиной этого явления является изменение величины Ra, связанное с изменением наиболее структурно чувствительного параметра расплава – вязкости [12].

В свою очередь, изменение числа Релея отражает не только развитие неустойчивости, но и изменение структуры течения, вызванного тепловой гравитационной конвекцией [8]. Исчезновение линии  $k_2$  в спектре Фурье, а, следовательно, и связанной с ней макроскопической неоднородности в радиальном распределении  $\tau$  в кристалле Ge<Ga,Gd>, по-видимому, связано непосредственно с изменением структуры течения.

Механизм образования поперечных неоднородностей с периодом распределения рекомбинационных центров  $\approx 10$  мм (линия  $k_1$ ) может быть обусловлен асимметрией теплового поля у фронта кристаллизации вращающегося слитка [8]. Эта асимметрия зависит от конфигурации системы расплав / кристалл и индивидуальных особенностей печи. Так как оба слитка выращивались в одной и той же печи и в одинаковых условиях, трудно предположить, что присутствие в расплаве гадолиния каким-то образом повлияет на формирование макроскопической неоднородности, связанной с асимметрией теплового поля. Действительно, мощность линии  $k_1$  в спектрах Фурье для обоих кристаллов одинакова.

Так же как и для особо чистого германия [7], радиальные распределения рекомбинационных центров в обоих кристаллах имеют четко выраженную структуру. Об этом свидетельствует одинаковый характер спектров Фурье

зависимостей  $\tau=f(x)$ , снятых на одной и той же пластине, но в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Примером такой структуры может являться концентрическое или спиральное распределение хорошо изученных в настоящее время свирл-дефектов в кремнии [6,13].

С целью определения основных параметров центров рекомбинации в Ge<Ga,Gd> проведено изучение температурных зависимостей времени жизни неравновесных носителей заряда. Величина  $\tau$  в этом случае определялась из измерений стационарной фотопроводимости и фотоэлектромагнитного эффекта при низком уровне возбуждения [14]. Методом наименьших квадратов был выполнен обсчет зависимости  $\tau=f(10^3/T)$ , используя многоуровневую статистику рекомбинации [15]. Получены следующие значения положения рекомбинационных уровней в запрещенной зоне:  $\Delta E_1=E_v+(0.10\pm 0.01)$  эВ, коэффициент рекомбинации для электронов  $\gamma_{n1}\sim T^{-n}$ , где  $n=5.3\pm 0.1$  и  $\Delta E_2=E_v+(0.18\pm 0.02)$  эВ. Наблюдающийся рост  $\gamma_{n1}$  с понижением температуры по закону  $T^{-n}$  указывает на то, что уровень  $E_v+(0.10\pm 0.01)$  эВ принадлежит центру, являющемуся притягивающим по отношению к захватываемому электрону [16]. Предполагается [17], что такими дефектами в p-Ge могут быть донорные центры, например, атомы кобальта, которые как показано в [18], присутствуют в германии на любых этапах очистки. Рекомбинационный центр с уровнем  $E_v+(0.18\pm 0.02)$  эВ может быть связан с комплексом кислород-вакансия [19].

Полученные значения параметров центров рекомбинации соответствуют приведенным в [17] для кристаллов германия p-типа проводимости, не содержащих РЗЭ. Это означает, что выращивание легированных галлием кристаллов детекторного германия в присутствии гадолиния не приводит к образованию новых рекомбинационных центров.

### Заключение

На примере детекторного германия, выращенного в присутствии гадолиния, продемонстрирована принципиальная возможность получения легированных монокристаллов с высокой однородностью распределения центров рекомбинации. Установлено, что введение в расплав гадолиния подавляет образование макроскопических неоднородностей, связанных со структу-

рой течения расплава, вызванного тепловое гравитационной конвекцией. Установлено, что легирование германия гадолинием не приводит к образованию новых центров рекомбинации.

### Список литературы

1. Алимов О.М., Быковский В.А., Петров В.В., Харченко К.В., Явид В.Ю. // Высокоочищенные вещества. - 1993. - № 1. - С. 119.
2. Алимов О.М., Петров В.В., Просолович В.С., Харченко К.В., Явид В.Ю. Способ выращивания монокристаллов германия: Патент. 201437 Российской Федерации. С30 В15/04.29/08. 15.06.94
3. Гришин В.П., Карпов Ю.А., Корнюшин С.И., Лашкарев Г.В., Матвеев В.Т., Шаховцов В.И., Шевченко А.Д., Шиндич В.Л. // УФЖ. - 1976. - Т. 21 - № 2. - С. 334.
4. Абросимов Н.В., Абросимова В.Н., Баженов А.В., Ерофеева С.А. // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. - 1986. - Т. 22. - № 2. - С. 181.
5. Богданов С.В., Копыловский Б.Д. // ФТТ. - 1961. - Т. 3. - № 3. С. 926.
6. Тарасик М.И., Якубеня С.Н., Янченко А.М. // Электронная техника. Сер. Материалы. - 1985. - № 8. - С. 48.
7. Явид В.Ю., Якубеня С.Н., Шамас Х.А. // Неорганические материалы. - 1998. - Т. 34. - № 12. - С. 1420.
8. Мюллер Г. Выращивание кристаллов из расплава. Конвекция и неоднородности. М.: Мир, 1991.
9. Литвинов В.В., Покотило Ю.М., Уренев В.И. // ЖТФ. - 1994. - Т. 64. - № 9. - С. 189.
10. Хакен Г. Синергетика. Иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. М.: Мир, 1985. - гл.1.
11. Заславский Г.М., Сагдеев Р.З. Введение в нелинейную физику. От маятника до турбулентности и хаоса. М.: Наука, 1988. - гл.11.
12. Глазов В.М., Чижевская С.Н., Глаголева Н.Н. Жидкие полупроводники. М.: Наука, 1967. - гл. 2.3.
13. Мильвидский М.Г., Освенский В.Б. Структурные дефекты в монокристаллах полупроводников. М.: Металлургия, 1984. - гл. 9. - С. 210.
14. Равич Ю.И. Фотомагнитный эффект в полупроводниках и его применение. М.: Советское радио, 1967.
15. Okada J. // J. Phys. Soc. Japan. - 1957. - V. 12. - № 12. - P. 1338.
16. Bonch-Bruевич V.L., Landsberg E.G. // Phys. Stat. Sol. - 1968. - V. 29. - P. 9.
17. Шадурская Л.И., Явид В.Ю. // ФТП. - 1982. - Т. 16. - № 4. - С. 758.
18. Каландадзе Г.И., Нарумидзе Г.С., Кервалишвили П.Дж. // ФТП. - 1978. - Т. 12. - № 5. - С. 904.
19. Литовченко П.Г., Гаврилов Г.М., Бородовский Я.А. // ФТП. - 1974. - Т. 8. - № 5. - С. 954.

## INFLUENCE OF RARE EARTHS ON RECOMBINATION CENTRES DISTRIBUTION IN p-Ge CRYSTALS FOR IONIZING RADIATION DETECTORS

V.Yu.Yavid, S.N.Jakubenja, A.R.Chelyadinskii  
Belarus State University, Minsk, 220050, F.Skaryna Ave. 4, Belarus  
e-mail: heii@phys.bsu.unibel.by

Radial distribution profiles of non-equilibrium charge carriers lifetime  $\tau$  in "detector-type" p-Ge crystals, grown by Czochralsky method at the presence of Gd, were investigated. It was determined, that the introduction of Gd in germanium melt gave more uniform distribution of  $\tau$  on the crystal diameter. It is shown that Gd in the melt suppresses formation of macroscopic inhomogeneities attributed with structure of melt flow caused by thermal gravitational convection. The energy standing of recombination centres in the band gap is determined. It was defined that doping of germanium with Gd did not form new centres of recombination.