

УДК 621.315.592

БЕСКОНТАКТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА БИПОЛЯРНОЙ ДИФФУЗИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Алмазов Л. А., Малютенко В. К., Федоренко Л. Л.

Предлагается новый метод определения коэффициента биполярной диффузии неравновесных носителей заряда (ННЗ) в полупроводниках, основанный на рассмотрении стационарного уравнения, нелинейность которого задается произвольными зависимостями темпа объемной рекомбинации r и коэффициента биполярной диффузии D от концентрации n . Приводятся результаты использования метода для измерения зависимости $D(n)$ в антимониде индия в диапазоне концентраций ННЗ $n=10^{17} \div 1.6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$. Обсуждаются возможные причины аномально сильного роста $D(n)$: $D \sim n$ от $D=36$ до $D=500 \text{ см}^2/\text{с}$ в InSb и результаты обработки экспериментальных данных других работ, полученных для Te и $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$. Метод может оказаться полезным для определения $D(n)$ в условиях одновременного проявления нелинейной рекомбинации, диффузии, вырождения ННЗ, электронно-дырочного рассеяния, непараболичности зоны проводимости, особенно характерных для узкозонных полупроводников.

Методы измерения коэффициента биполярной диффузии, как правило, основаны на известном для невырожденного полупроводника соотношении Эйнштейна между подвижностью u и коэффициентом биполярной диффузии D : $D = kT/e$. При больших концентрациях неравновесных носителей заряда (ННЗ) указанное соотношение перестает выполняться. Это может обуславливаться электронно-дырочным рассеянием [1] либо вырождением [2] носителей заряда. Действие любого из этих эффектов приводит к тому, что коэффициент биполярной диффузии становится функцией концентрации $D = D(n)$. В условиях сильного отклонения концентрации ННЗ от равновесной в полупроводниках определение D усложняется влиянием нелинейной рекомбинации и непараболичности зоны проводимости на экспериментально измеряемые величины. В узкозонных материалах эти эффекты начинают проявляться при сравнительно невысоких концентрациях ННЗ (например, при $n \geq 10^{16} \text{ см}^{-3}$ для InSb). В работе [3] предложен метод определения $D(n)$ в случае поверхностного фотовозбуждения ННЗ на основе решения уравнения непрерывности

$$\frac{d}{dx} D(n) \frac{dn}{dx} = r(n) \quad (1)$$

с граничными условиями

$$S(n_0) n_0 - D(n_0) \left. \frac{dn_0}{dx} \right|_{x=0} = I, \quad (1')$$

где $I = \eta I_0 (1 - R_0)$, I_0 — интенсивность лазерного излучения, η — квантовый выход, R_0 — коэффициент отражения возбуждающего излучения, n_0 — концентрация $n(x)$ на поверхности $x=0$. В [3] предполагалась допустимой степенная аппроксимация темпа объемной $r(n) = Bn^\beta$, скорости поверхностной $S = Cn^\gamma$ рекомбинации, коэффициента биполярной диффузии $D(n) = An^\alpha$ от концентрации (где $A, B, C, \alpha, \beta, \gamma = \text{const}$). В настоящей работе подобная задача решается при произвольном виде этих зависимостей. Измеряемыми величинами в предлагаемом методе являются отражение и пропускание ИК излучения в зависимости от интенсивности зона-зонного лазерного возбуждения.

Основные соотношения. В результате первого интегрирования уравнения (1) будем иметь

$$dn/dx = -n/L(n), \quad (2)$$

где введена вспомогательная функция

$$L(n) = nD(n) \left[2 \int_0^n r(n') D(n') dn' \right]^{1/2}, \quad (3)$$

имеющая смысл диффузионной длины. Полное число ННЗ, приходящихся на единицу площади освещаемой поверхности, равно (для диффузионно-толстой пластины)

$$N = \int_0^{d_0} n dx = - \int_0^{n_0} n \frac{dx}{dn} dn, \quad (4)$$

где d — толщина кристалла. Подставляя (2) в (4), находим

$$N = \int_0^{n_0} L(n) dn. \quad (5)$$

В случае малой скорости поверхностной рекомбинации, т. е. при

$$S(n_0) L(n_0)/D(n_0) \ll 1, \quad (6)$$

из (1), (2) можно получить простую связь между $D(n_0)$ и $L(n_0)$

$$L(n_0) = D(n_0) n_0/I \quad (7)$$

[условие (6), как правило, реализуется при высоких концентрациях ННЗ вблизи травленной поверхности]. Дифференцируя в (5) N по n_0 и используя (7), получим

$$D(n_0) = \frac{I}{n_0} \frac{dN}{dn_0}, \quad (8)$$

или (в виде, более удобном для графической обработки результатов)

$$D(n_0) = \frac{I}{n_0} \frac{dN/dI}{dn_0/dI}. \quad (9)$$

Таким образом, для вычисления величины коэффициента диффузии D при концентрации носителей n_0 необходимо знать зависимость поверхностной концентрации n_0 и полного числа носителей N от I . Связь величин полного числа N и поверхностной концентрации n_0 ННЗ, входящих в (7), с измеряемым на опыте относительным изменением пропускания $\Delta T/T$ и отражения $\Delta R/R$ ИК излучения была получена в [4, 5]:

$$N = - \frac{1}{\sigma_0} \left[\frac{\Delta T}{T} + \frac{(q-1)^2}{4q} \frac{\Delta R}{R} \right], \quad (10)$$

$$n_0 = - \frac{\Delta R}{R} \frac{q(q^2-1)\omega^2 m_{\text{opt}}}{3\pi e^2}, \quad (11)$$

где q — показатель преломления на невозбужденной грани кристалла, σ_0 — сечение поглощения ИК излучения свободными носителями заряда, e — заряд электрона, ω — круговая частота зондирующей волны, m_{opt} — оптическая эффективная масса носителей заряда. Формулы (10), (11) получены в предположении $\lambda/4\pi q \ll L(n)$, где $\lambda = 2\pi c/\omega$ [медленное изменение $n(x)$ на длине волны зондирующего излучения в полупроводнике], а также малости величин $\Delta T/T$, $\Delta R/R$, $\sigma_0 N$ по сравнению с единицей. Подставляя (10), (11) в (8), получим

$$D(I) = k_1 \left[\frac{d(\Delta T/T)/dI}{d(\Delta R/R)/dI} + k_2 \right] I \left(\frac{\Delta R}{R} \right)^{-1}, \quad (12)$$

где

$$k_1 = \frac{1}{\sigma_0} \frac{(8\pi e^2)^2}{q^2 (q^2 - 1) \omega^4 m_{0pt}^2}, \quad k_2 = \frac{(q-1)^2}{4q}.$$

Обработка экспериментальных результатов и их обсуждение. Измерялись зависимости относительного пропускания $\Delta T/T$ и отражения $\Delta R/R$ излучения CO_2 -лазера ($\lambda=10.6$ мкм) от интенсивности возбуждения образцов антимионда индия рубиновым лазером ($\lambda=0.69$ мкм) с модулированной добротностью ($\Delta t_n = 40$ нс). Экспериментальная установка и методика исследований были ана-

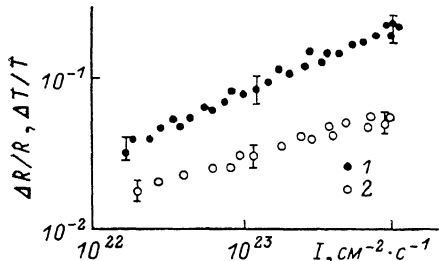


Рис. 1. Экспериментальные зависимости относительного пропускания $\Delta T/T$ (1), отражения $\Delta R/R$ (2) излучения CO_2 -лазера ($\lambda=10.6$ мкм) от интенсивности возбуждения антимионда индия рубиновым лазером ($\lambda=0.69$ мкм).

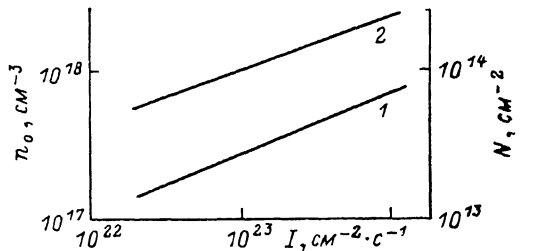


Рис. 2. Зависимости поверхностной концентрации n_0 (1) и полного числа N ННЗ (2) от интенсивности возбуждения I .

логичны описанным в [4]. Исследовались пластины из InSb ($N_a - N_d = 10^{14} \text{ см}^{-3}$) толщиной $d=100$ мкм, намного большей длины диффузии ННЗ $L=7$ мкм. Освещаемая поверхность обрабатывалась стандартным травителем СР-4А для придания ей малой скорости поверхностной рекомбинации.

Экспериментальные зависимости относительного пропускания ($\Delta T/T$) (1) и отражения ($\Delta R/R$) (2) представлены на рис. 1. Как видно из рисунка, зависимости n_0 (1), N (2) явно сублинейны. В результате их обработки по формулам (9)—(11) были получены зависимости n_0 (1) и N (2) (рис. 2) и концентрационная зависимость D (n) (рис. 3). Видно, что коэффициент биполярной диффузии D почти линейно растет с концентрацией $D \sim n$, что согласуется с результатами и выводами, полученными в [4]. Проведенные оценки показали, что

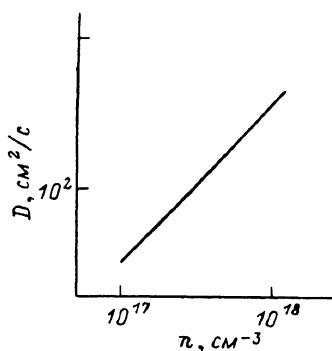


Рис. 3. Концентрационная зависимость коэффициента биполярной диффузии D (n) для InSb .

влиянием разогрева носителей можно пренебречь. По-видимому, сильный рост D (n) связан с включением электронно-дырочного рассеяния при высоких концентрациях ННЗ. Этот процесс может приводить к дополнительному росту биполярной диффузии из-за увлечения малоподвижных носителей-дырок высокоподвижными электронами. Данный метод был также использован для расчета коэффициента биполярной диффузии по экспериментальным данным других работ для $\text{Pb}_{0.83}\text{Sn}_{0.17}\text{Te}$ [6] и Te [7]. В результате получено существенное расхождение между найденными значениями D для $\text{Pb}_{0.83}\text{Sn}_{0.17}\text{Te}$ ($D=0.8 \div 5.45 \text{ см}^2/\text{с}$), для Te ($D=16 \div 104 \text{ см}^2/\text{с}$) в диапазоне интенсивностей возбуждения $I=10^{20} \div 10^{24} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и принятыми в этих работах постоянными значениями $D=26$ и $35 \text{ см}^2/\text{с}$. Причиной такого расхождения является то обстоятельство, что в указанных работах предполагается, что $D=\text{const}$ во всем измеряемом диапазоне концентраций ННЗ. Это привело к значительной погрешности при расчете представленных там зависимостей n (1), N (2) из экспериментальных данных по фотопроводимости и фотомагнитной ЭДС. Следовательно, в $\text{Pb}_{0.83}\text{Sn}_{0.17}\text{Te}$

и Te , как и в случае $InSb$, D существенно зависит от концентрации HNZ , и при расчете параметров HNZ необходимо решать нелинейную задачу (1), в которой учитываются вырождение и электронно-дырочное рассеяние в условиях нелинейной рекомбинации и диффузии HNZ .

В заключение следует отметить, что предлагаемый метод подобно методам определения параметров HNZ , описанным в [8, 9], не требуя конкретизации исходной модели полупроводника, позволяет по экспериментальным данным определять величину $D(n)$ в условиях одновременного проявления ряда эффектов, характерных для узкозонных полупроводников. Метод прост в реализации, не требует дорогостоящей аппаратуры и допускает автоматизацию измерений и обработки результатов с использованием ЭВМ.

Л и т е р а т у р а

- [1] Грибников Э. С., Мельников В. И. — ФТП, 1968, т. 2, в. 9, с. 1352—1363.
- [2] Auston D. H., Shank C. V. — Phys. Rev. Lett., 1974, v. 32, N 20, p. 1120—1123.
- [3] Алмазов Л. А., Малютенко В. К., Федоренко Л. Л. — УФЖ, 1981, т. 26, в. 5, с. 734—739.
- [4] Алмазов Л. А., Малютенко В. К., Федоренко Л. Л. — ФТП, 1983, т. 17, в. 7, с. 1211—1216.
- [5] Алмазов Л. А., Липтуга А. И., Малютенко В. К. — ФТП, 1980, т. 14, в. 10, с. 1940—1946.
- [6] Hoai T. N., Herrmann K. H. — Phys. St. Sol., 1977, v. 83, N 2, p. 465—470.
- [7] Galkin G. N., Herrmann K. H., Bobrova E. A. — Phys. St. Sol., 1977, v. 82, N 1, p. 237—242.
- [8] Зюганов А. Н. — ПТМ, 1978, № 12, с. 108—119.
- [9] Зюганов А. Н., Свечников С. В. Инжекционно-контактные явления в полупроводниках. Киев, 1981. 255 с.

Институт полупроводников АН УССР
Киев

Получена 3.03.1987
Принята к печати 21.07.1987