

- [8] Bernholz J., Lipari N. O., Pantelides S. T., Sheffler M. — Phys. Rev. B, 1982, v. 26, N 10, p. 5706—5718.
 [9] Picoli G., Chomette A., Lannoo M. — Phys. Rev. B, 1984, v. 30, N 12, p. 7138—7149.
 [10] Хакимов З. М., Махмудов А. Ш., Левин А. А. — ДАН СССР, 1986, т. 290, в. 1, с. 157—161.
 [11] Lewdin P.-O. — Adv. Chem. Phys., 1959, v. 2, p. 207.
 [12] Lewter J. E. — Phys. Rev., B, 1977, v. 15, N 8, p. 3928—3942.
 [13] Chadi D., Kohen M. — Phys. Rev. B, 1973, v. 8, N 12, p. 5747—5753.

Институт ядерной физики
 АН УзССР
 Улугбек

Получено 10.06.1987
 Принято к печати 5.01.1988

ФТП, том 22, вып. 8, 1988

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВАКАНСИЙ С ДОНОРАМИ V ГРУППЫ В *n*-ГЕРМАНИИ

Витовский Н. А., Емцев В. В., Машовец Т. В., Полоскин Д. С.

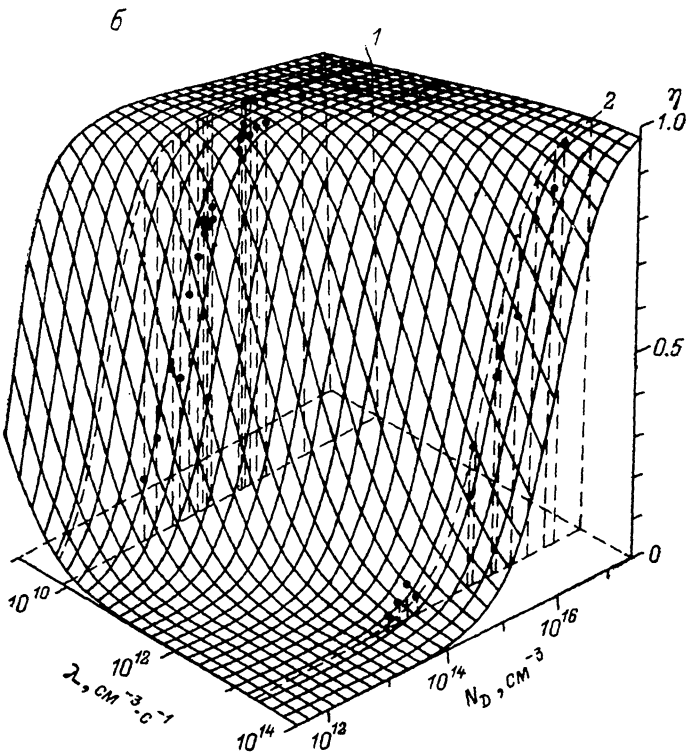
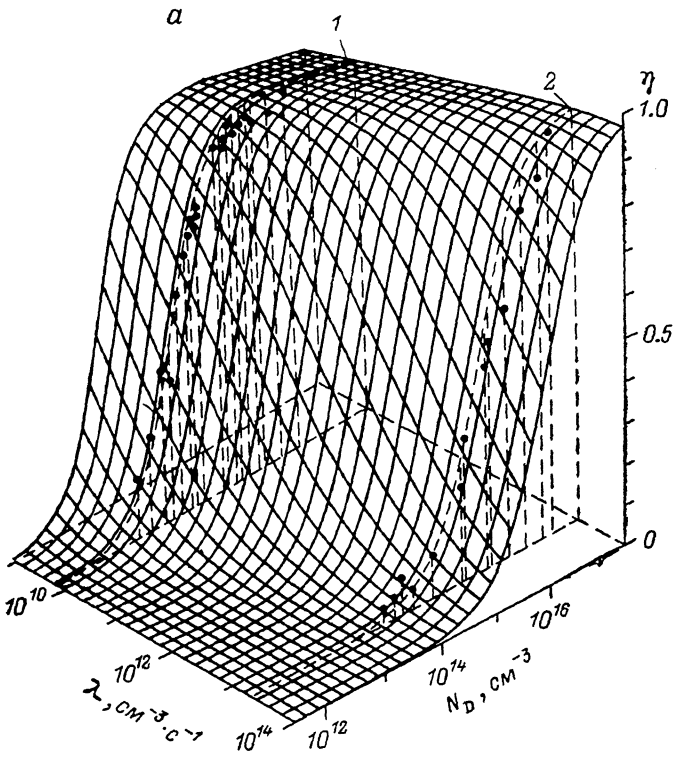
В [1] было показано, что решающим фактором, определяющим скорость накопления стабильных дефектов в *n*-германии при облучении его γ -лучами или электронами при комнатной температуре, является способность вакансий (*V*) двигаться и взаимодействовать с атомами донорных примесей (*D*) V группы. Отрицательно заряженная вакансия, созданная при облучении, дрейфует в поле положительно заряженного донора и при достаточном сближении с ним образует электрически не активный комплекс VD [2^{-5}].¹ По пути она может исчезнуть, прорекомбинировав со свободным межузельным атомом *I*, также созданным при облучении. Межузельные атомы значительно подвижнее, чем вакансии (энергии миграции E_m равны 0.42 для V^- , 0.15 для I^0 и 0.07 эВ для I^+) [6]. В результате этого процесс рекомбинации *V* с *I* может конкурировать с уходом вакансий на доноры $V^- + D^+ \rightarrow VD$, даже если концентрация межузельных атомов N_I мала по сравнению с концентрацией доноров N_D . Парциальные времена, характеризующие процессы рекомбинации (τ_{IV}) и образования комплексов (τ_{VD}), могут быть записаны в виде

$$\begin{aligned} \tau_{IV} &= 4\pi D_I \rho_{IV} N_V, \\ \tau_{VD} &= 4\pi D_V \rho_{VD} N_D, \end{aligned} \quad (1)$$

где D_I , D_V — коэффициенты диффузии *I* и *V*; ρ_{IV} , ρ_{VD} — соответствующие радиусы взаимодействия, $N_V = \lambda \tau_V$ — стационарная концентрация вакансий, λ — темп генерации пар Френкеля, определяемый видом, энергией и интенсивностью излучения, τ_V — время жизни вакансии по отношению ко всем процессам ее исчезновения. Стационарная концентрация межузельных атомов $N_I = \lambda \tau_I$ определяется интенсивностью стоков $\tau_{ст}^{-1}$.

В настоящем сообщении приводится номограмма относительной эффективности η образования комплексов VD : $\eta = \frac{1}{\lambda} \frac{dN_{VD}}{dt}$. Пользуясь ею, можно сразу определить, какая доля вакансий уходит на образование комплексов VD при любых заданных значениях N_D и $\lambda = \sigma J N_{Ge}$ (σ — сечение образования пары Френкеля, известная функция энергии E бомбардирующих электронов или γ -квантов, J — плотность их потока, $N_{Ge} = 4.45 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$). Поскольку σ и J в заданных условиях эксперимента известны, можно предсказать скорость образования комплексов VD для германия с любой концентрацией N_D ; можно

¹ Вакансия, в принципе, может взаимодействовать и с атомами других примесей, например кислорода, однако в *n*-германии, не подвергавшемся специальным обработкам или дополнительному легированию примесями не V группы, взаимодействие с атомами доноров V группы является для вакансий доминирующим процессом.



Расчетная зависимость $\eta = \eta(N_D, \lambda)$ для *n*-германия при 300 К.

$\tau_{от}$, с: а — 20, б — 0.2. Сечение 1 — $\lambda = 7 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ (облучение γ -квантами ^{60}Co , $\sigma = 5 \cdot 10^{-26} \text{ см}^2$, $J = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$); сечение 2 — $\lambda = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ (облучение электронами, $E = 1 \text{ МэВ}$, $\sigma = 2 \cdot 10^{-23} \text{ см}^2$, $J = 2.2 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$). Точки — эксперимент.

также предсказать, как и насколько изменится эта скорость при изменении интенсивности облучения.²

Зависимость $\eta(N_D, \lambda)$ изображается поверхностью в трехмерном пространстве. На рисунке эта поверхность представлена в виде сетки линий равной концентрации N_D и линий равного темпа генерации пар Френкеля λ . При построении экспериментальных точек для расчета было принято значение пороговой энергии образования пары Френкеля $E_d = 30$ эВ.

Номограмма была рассчитана путем решения системы уравнений

$$\begin{aligned} \tau_{\bar{v}}^{-1} &= \tau_{I\bar{v}}^{-1} + \tau_{\bar{v}D}^{-1}, \\ \tau_{I\bar{v}}^{-1} &= \tau_{I\bar{v}}^{-1} + \tau_{\sigma\bar{v}}^{-1} \end{aligned} \quad (2)$$

с использованием полученного в [1] выражения для N_I .

Окончательное уравнение для нахождения η имеет вид

$$\frac{AN_D}{\eta} - \frac{\lambda}{N_D} \frac{\eta(BC + \Omega N_D)}{(1 - \eta)(N_D + C)} = AN_D - \tau_{\sigma\bar{v}}^{-1}, \quad (3)$$

где

$$A = 4\pi D_{v-\rho_{v-D+}}, \quad B = \frac{D_{I+}}{D_{v-}}, \quad C = \beta N_c \exp\left(-\frac{E_I}{kT}\right), \quad \Omega = \frac{\rho_{I\sigma v} D_{I\sigma}}{\rho_{v-D+} D_{v-}},$$

E — энергия, β — фактор вырождения донорного состояния межузельного атома, N_c — эффективная плотность состояний в зоне проводимости.

В работе [1] были высказаны соображения, на основании которых следует полагать, что в n -германии свободные межузельные атомы в основном нейтральны ($E_I \geq 0.5$ эВ), так что выполняется соотношение $D_{I+\rho_{I+v}} N_{I+} \ll \ll D_{I\sigma\rho_{I\sigma v}} N_{I\sigma}$. Это предположение было принято и в настоящей работе.

Использованные в расчете параметры $\rho_{v-D+} = \rho_{v-I+} = q^2/xkT = 35 \text{ \AA}$, $\rho_{I\sigma v} = = 2.5 \text{ \AA}$, $\beta = 1/2$ обеспечивают наилучшее согласие с экспериментом. Предэкспоненциальный фактор D_0 в D_{v-} , $D_{I\sigma}$, D_{I+} принят равным $a^2\nu = 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$ (a — межатомное расстояние, $x = 16$ — диэлектрическая постоянная, q — заряд электрона, $\nu \approx 10^{13} \text{ с}^{-1}$ — частота колебаний атомов), $\tau_{\sigma\bar{v}} = 20$ и 0.2 с.

Сравнение номограмм a и b на рисунке показывает следующее.

1) Согласие расчетных зависимостей $\eta(N_D)$ с экспериментальными может быть получено для существенно различных λ при одном и том же наборе параметров. При этом важно отметить, что при расчете λ для γ -лучей ^{60}Co и для электронов (1 МэВ) использовалось одно и то же значение $E_d = 30$ эВ.

2) Различие зависимостей $\eta(N_D, \lambda)$ при разных $\tau_{\sigma\bar{v}}$ велико в области «малых» λ (при $\lambda < 10^{12} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$). Видно, что для $\tau_{\sigma\bar{v}} = 20$ с согласие результатов расчета и эксперимента оказывается гораздо лучшим, чем для $\tau_{\sigma\bar{v}} = 0.2$ с. Это согласуется с [1], где давалась оценка $\tau_{\sigma\bar{v}} = 10 \div 30$ с для образцов, использовавшихся в экспериментах по γ -облучению. При «больших» λ ($\lambda > 10^{12} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$) чувствительность зависимостей $\eta(N_D, \lambda)$ к величине $\tau_{\sigma\bar{v}}$ уменьшается, что вполне естественно, поскольку уход I на стоки на фоне мощного процесса $I-V$ -рекомбинации мог бы быть замечен только при очень большой мощности стоков ($\tau_{\sigma\bar{v}} < < 0.1$ с).

Следует заметить, что при очень больших интенсивностях ионизации, производимой облучением, неравновесные (но стационарные) зарядовые состояния I и V могут отличаться от равновесных. В этом случае взаимодействия, оставаясь, в принципе, теми же, определялись бы другими по величине параметрами ρ и D (например, $\rho_{v\sigma D+} = 2.5 \text{ \AA}$ вместо $\rho_{v-D+} = 35 \text{ \AA}$; $D_{v\sigma}$ вместо D_{v-}). При построении номограммы этот случай не рассматривался.

Таким образом, пользуясь номограммой, можно сразу определять эффективность образования комплексов вакансия—донор в германии n -типа при

² Поскольку концентрация N_D свободных (не связанных в комплексы VD) доноров изменяется в процессе облучения, эффективность η также зависит от времени облучения. Однако в любой момент мгновенное значение η определяется мгновенной величиной N_D .

заданных концентрации доноров и параметрах излучения (вид излучения, энергия частицы, интенсивность).

Авторы глубоко признательны О. А. Усову за составление программы графического построения номограммы на ЭВМ, а также В. Л. Винецкому за обсуждение статьи.

Л и т е р а т у р а

- [1] Витовский Н. А., Абдусаттаров А. Г., Емцев В. В., Машовец Т. В., Полоскин Д. С. — ФТП, 1987, т. 21, в. 10, с. 1826—1831.
- [2] Емцев В. В., Машовец Т. В. — Письма ЖЭТФ, 1971, т. 13, в. 12, с. 675—679.
- [3] Абдусаттаров А. Г., Емцев В. В., Машовец Т. В. — Письма ЖЭТФ, 1986, т. 12, в. 23, с. 1461—1463.
- [4] Арифов П. У., Арутюнов Н. Ю., Емцев В. В. — ФТП, 1981, т. 15, в. 8, с. 1550—1556.
- [5] Арутюнов Н. Ю., Емцев В. В., Рубинова Э. Э., Трошаков В. Ю. — ФТП, 1986, т. 20, в. 3, с. 552—555.
- [6] Ершов С. Н., Пантелеев В. А., Нагорных С. Н., Черняховский В. В. — ФТТ, 1977, т. 19, в. 1, с. 322—323.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получено 21.07.1987
Принято к печати 1.02.1988

ФТП, том 22, вып. 8, 1988

АКУСТОЭЛЕКТРОННОЕ ЗАТУХАНИЕ В УСЛОВИЯХ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В СУЛЬФИДЕ КАДМИЯ

Миргородский В. И., Пешин С. В.

В работе [1] было предложено использовать акустоэлектронное затухание для измерения объемной и поверхностной электропроводностей кристаллов пьезополупроводников. Данное сообщение посвящено применению этого метода для исследования кинетики изменения проводимости фоточувствительных кристаллов сульфида кадмия в нестационарных условиях во время переходных процессов при резком включении и выключении подсветки, возбуждающей фотопроводимость.

Экспериментальная установка была подобна использованной в работе [2]. Измерение электрических импедансов образцов осуществлялось посредством измерения комплексных коэффициентов передачи делителя на частоте звука 18 МГц, где в качестве одного из сопротивлений использовались исследуемые кристаллы, а в качестве другого — сопротивление 50 Ом.

Эксперименты выполнялись на образцах монокристаллического фоточувствительного сульфида кадмия размерами $3 \times 2 \times 1$ мм с применением сдвиговой акустической волны, распространяющейся перпендикулярно гексагональной оси \hat{c} со смещениями вдоль \hat{e} . Электропроводность образцов изменялась с помощью освещения их лампой накаливания через стандартные светофильтры типа ЗС-2+СЗС-24. Для быстрого прерывания света использовался центральный фотографический затвор с временем срабатывания около 1 мс, что меньше самого малого времени релаксации фотопроводимости исследуемых кристаллов, составляющего ~ 10 мс.

Эксперименты проводились следующим образом. После предварительной 5-минутной выдержки образца в темноте включалась подсветка, и во время переходного процесса осуществлялась регистрация мощности прошедшего через образец звука, а также действительной и мнимой частей проводимости образца. После окончания процесса регистрации, занимающего обычно не более 0.1 с, образец выдерживался при освещении в течение 5 мин, а затем производилось выключение подсветки с регистрацией тех же параметров, что и при включении.