

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМНОВОЙ ПРОВОДИМОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ CdS ОТ ЭНЕРГИИ ОБЛУЧАЮЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ

© В.Т.Мак

Одесский государственный университет им. И.И.Мечникова,
270100 Одесса, Украина
(Получена 20 марта 1995 г. Принята к печати 21 апреля 1995 г.)

Исследовано влияние облучения электронами с энергиями 0.6–50 МэВ на темновую проводимость монокристаллов сульфида кадмия. Показано, что с ростом энергии облучающих электронов возрастает роль ионизационных процессов в дефектообразовании. При энергиях электронов более 7.5 МэВ эти процессы начинают играть доминирующую роль, вследствие чего резко уменьшается скорость введения первичных радиационных дефектов — вакансий и междоузлий кадмия.

Темновая проводимость полупроводника играет первостепенную роль при создании большинства полупроводниковых приборов. Поэтому особое значение приобретает знание влияния облучения на этот параметр материала. В ранее опубликованных работах [1–4] было показано, что при облучении нелегированных и легированных медью монокристаллов сульфида кадмия γ -фотонами и электронами с энергией 1 МэВ их темновая проводимость σ_d стремится к своему предельному значению $\sigma_d = 3 \cdot 10^{-12} \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$, которому соответствует положение уровня Ферми $E_c - 0.77 \text{ эВ}$.

Известно, что, кроме процессов дефектообразования вследствие столкновений ядерных частиц с атомами кристалла, в полупроводниках существенную роль играют радиационно-стимулированные процессы, причиной которых является ионизация кристалла. Поэтому при анализе дефектообразования вследствие облучения заряженными частицами (например, электронами) следует учитывать оба фактора. Подтверждением этого являются результаты проведенных исследований зависимости темновой проводимости от энергии облучающих электронов.

Нелегированные и легированные медью монокристаллы сульфида кадмия облучались электронами с энергиями до 50 МэВ. На рис. 1 приведены дозовые зависимости удельной проводимости монокристаллов CdS для различных энергий облучающих электронов. Аналогичные зависимости были получены при исследовании монокристаллов CdS:Cu. Как в случае нелегированных, так и в случае легированных

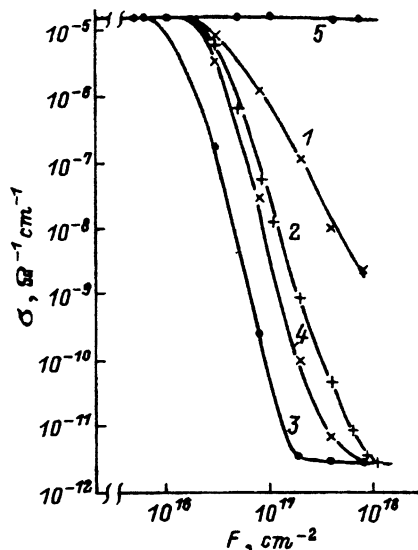


Рис. 1. Дозовые зависимости удельной электропроводности σ при 290 К для монокристаллов CdS при различных энергиях облучающих электронов E , МэВ: 1 — 0,6, 2 — 1, 3 — 2, 4 — 7,5, 5 — 30 и 50.

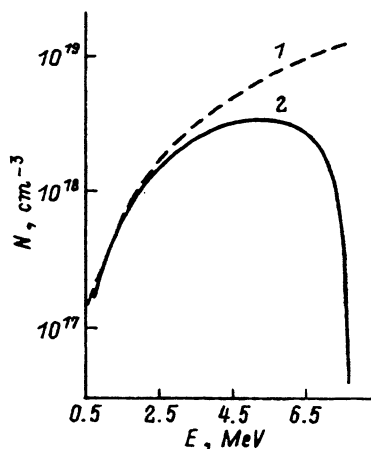


Рис. 2. Зависимость концентрации межзельных атомов кадмия N , возникающих при облучении, от энергии облучающих электронов E без учета (1) и с учетом (2) ионизационных эффектов

медью монокристаллов CdS темновая удельная электропроводность изменяется немонотонно при увеличении энергии облучающих электронов. Именно возрастание ионизационных эффектов при увеличении энергии электронов является причиной такой немонотонности.

Как было показано в работах [1-4], предельное значение удельной темновой проводимости в монокристаллах сульфида кадмия обусловлено введением при облучении высокой концентрации донорных дефектов — междоузлий кадмия (Cd_i) и акцепторных дефектов — вакансий кадмия (V_{Cu}) в CdS либо атомов меди в кадмиевых узлах (Cu_{Cd}) в CdS:Cu. Ясно, что значение проводимости кристалла, которое получено вследствие облучения, будет зависеть от эффективности двух конкурирующих процессов: процесса дефектообразования вследствие столкновений быстрых электронов с атомами кристаллической решетки и процесса радиационного отжига, связанного с ионизационно-стимулированной диффузией образованных дефектов.

Концентрация дефектов N , возникающих вследствие бомбардировки электронами интегральным потоком Φ , равна

$$N = \Sigma_d \nu \Phi N_0, \quad (1)$$

где N_0 — концентрация атомов вещества, Σ_d — дифференциальное сечение дефектообразования, ν — среднее число дефектов, возникающих в одном акте рассеяния. Последняя величина может быть найдена, например, с использованием модели Кинчина-Пиза [5]. Дифференциальное сечение дефектообразования Σ_d вычисляется по известным соотношениям, приведенным, например, в [6].

Вследствие миграции первичных радиационных дефектов в кристалле во время облучения образованные вакансии и межузельные атомы кадмия могут приближаться друг к другу и вступать во взаимодействие. Это взаимодействие приводит к исчезновению первичных дефектов со скоростью

$$dN/dt = 4\pi N^2 D^* R, \quad (2)$$

где D^* — коэффициент диффузии подвижного дефекта, R — радиус взаимодействия межузельного атома со своей вакансией. В соотношении (2) учтено, что в сульфиде кадмия подвижными дефектами являются атомы кадмия в междоузлиях [7], а также то, что межузельный атом более вероятно будет взаимодействовать во своей вакансией, поскольку изначальная концентрация вакансий в исследуемых кристаллах не превышала 10^{16} см^{-3} . Величина $R \simeq (1-3)a$, где a — постоянная решетки [8].

В работе [9] показано, что увеличение концентрации высокоэнергетичных носителей заряда в твердом теле приводит в ускорению рекомбинационно-стимулированной диффузии. При облучении быстрыми электронами значительная часть энергии последних уходит на ионизацию атомов кристалла, поэтому коэффициент диффузии межузельных атомов кадмия должен возрастать. Его значение вычислено в [10]:

$$D^* = a^2 m/p. \quad (3)$$

Здесь m — скорость изменения заряда атома кадмия при облучении, p — число эквивалентных положений, в которые может попасть диффундирующий атом.

Концентрация высокоэнергетичных электронов, возникающих вследствие ионизации при электронном облучении, может быть вычислена с помощью соотношения

$$n = (dE/dx) D\tau/I, \quad (4)$$

где D — интенсивность электронного потока, τ — время жизни высокоэнергетичных электронов, I — средний ионизационный потенциал. Удельные потери энергии dE/dx , быстрых электронов можно вычислить, воспользовавшись, например, соотношениями, приведенными в [11].

С помощью соотношений (1)–(4) была рассчитана зависимость концентрации межузельных атомов кадмия от энергии облучающих электронов при дозе облучения 10^{17} см^{-2} . Необходимые для вычислений значения величин, входящих в формулы, были взяты из литературы либо получены в собственных экспериментах.

На рис. 2 приведены теоретические зависимости концентрации межузельных атомов кадмия от энергии облучающих электронов, рассчитанные без учета (кривая 1) и с учетом (кривая 2) влияния описанных выше процессов ионизации на скорость введения дефектов. Легко видеть, что в кристаллах сульфида кадмия процессы отжига первичных радиационных дефектов в подрешетке кадмия становятся существенными уже при энергиях облучающих электронов около 4 МэВ, а при энергиях электронов, больших 8 МэВ, межузельные атомы (и вакансии) кадмия практически не возникают. Однако,

согласно (4), значение энергии, при которой становятся существенными рекомбинационно-стимулированные процессы, зависит от скорости введения межузельных атомов кадмия при облучении. Эксперименты, проведенные при различных интенсивностях электронных потоков, подтвердили этот вывод. Подобные результаты были получены также при облучении монокристаллов CdS:Cu.

Проведенное моделирование процессов дефектообразования в монокристаллах сульфида кадмия позволило объяснить, почему при облучении последних высокоэнергетичными электронами (с энергией больше 7.5 МэВ) не наблюдалось смещение уровня Ферми к его предельному положению, которое имеет место при облучении электронами с энергиями 0.6–7.5 МэВ. Причина в том, очевидно, что при облучении высокоэнергетичными электронами вследствие рекомбинационно-стимулированного отжига не образуются дефекты Cd_i и V_{Cd} , которые и обуславливают соответствующее предельное положение уровня Ферми.

Список литературы

- [1] А.П. Галушка, Г.Е. Давидюк, В.Т. Мак. ФТП, **8**, 2219 (1974).
- [2] А.П. Галушка, В.Т. Мак, Ю.И. Заславский. *Способ обработки монокристаллов сернистого кадмия*. А.с. СССР, № 563757 (1977).
- [3] А.П. Галушка, Г.Е. Давидюк, В.Т. Мак, В.И. Куц, Н.С. Богданюк. Изв. вузов. Физика, № 10, 128 (1977).
- [4] Г.Е. Давидюк, Н.С. Богданюк, В.В. Божко, В.Т. Мак. *Фотоэлектроника* (Одесса, 1990) вып. 3, с. 7.
- [5] Г. Кинчин, Р. Пиз. УФН, **60**, 590 (1956).
- [6] В.С. Вавилов, Н.А. Ухин. *Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах*. (М., Атомиздат, 1969).
- [7] В.Т. Мак, В.Е. Буковский, В.И. Стеценко. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **27**, 457 (1991).
- [8] М.А. Эланго. *Элементарные неупругие радиационные процессы*. (М., Наука, 1988).
- [9] В.Л. Винецкий, Г.Е. Чайка. ФТТ, **24**, 2170 (1982).
- [10] В.Т. Мак. ЖТФ, **63**, 173 (1993).
- [11] В.С. Вавилов, Н.П. Кеклидзе, Л.С. Смирнов. *Действие излучений на полупроводники*. (М., Наука, 1988).

Редактор Т.А. Полянская

Dependence of dark conductivity of CdS single crystals on the energy of bombarding electrons

V.T. Mak

Odessa State University, 270100 Odessa, the Ukraine