

05;06;10

Влияние электронного облучения на рекомбинацию и прилипание в пленочных фотопроводниках на основе $A^2B^6-A^4B^6$

© В.Э. Бухаров, А.Г. Роках, С.В. Стецюра

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского

Поступило в Редакцию 28 апреля 1998 г.

Исследуется воздействие электронного облучения на широкозонные фоточувствительные пленки соединений типа A^2B^6 с субмикронными включениями A^4B^6 , образующими с вышеуказанными соединениями ограниченные твердые растворы. Показано увеличение радиационной стойкости соединений типа A^2B^6 при добавлении A^4B^6 . Обнаружено различное действие радиации на мелкие и глубокие уровни в широкозонном полупроводнике. Предлагается объяснение полученным экспериментальным данным с использованием модели гетерофазного полупроводника.

Исследования, проводимые нами в последние годы, выявили, что введение в широкозонную фоточувствительную матрицу типа A^2B^6 субмикронных включений узкозонной фазы типа A^4B^6 существенно повышает деградационную стойкость фотопроводника (ФП), почти не оказывая влияния на положение собственного максимума спектральной чувствительности исходного вещества. Изучение этого явления представляется актуальным, поскольку быстрая фотоутомляемость и деградация под влиянием внешних воздействий соединений типа A^2B^6 существенно сужает круг их применения.

Целью данной работы является сравнительный анализ воздействия электронного облучения на время жизни и время фотоответа фотопроводящих пленок типа $CdS(Se)$ и ограниченных твердых растворов $CdS(Se)-PbS$ с содержанием узкозонной компоненты не более долей процента.

Для решения указанной задачи измерялись характеристики пленочных образцов до и после облучения электронами допороговых энергий (облучение проводилось в вакууме $10^{-5}-10^{-4}$ Торр с помощью

электронной пушки, доза облучения $4.4 \cdot 10^9$ rad, анодное напряжение 10 kV).

Как известно, электронно-наведенная проводимость (катодопроводимость, — КП) Y монополярного достаточно тонкого (межэлектродное расстояние a и длина электродов l много больше толщины пленки d) образца n -типа при достаточно высоком уровне возбуждения равна [1]:

$$Y(E_0) = \int_0^d \frac{l\sigma}{a} dx = \frac{le}{a} \int_0^d \mu n(x, E_0) dx = \frac{le}{a} \int_0^d \mu \tau(x) G(x, E_0) dx, \quad (1)$$

где E_0 — начальная энергия электронов, σ — удельная проводимость, e — элементарный заряд, μ и τ — подвижность и время жизни электронов соответственно, n — концентрация свободных электронов, G — функция генерации носителей электронным пучком [1],

$$G(x, E_0) = \frac{J}{eE'_g} \left| \frac{dE}{dx} \right|, \quad (2)$$

где J — плотность тока пучка, E'_g — энергия образования электронно-дырочной пары, равная [1] приблизительно утроенной ширине E_g запрещенной зоны бомбардируемого материала, а функцию энергетических потерь $|dE/dx|$ можно записать [1] как

$$\left| \frac{dE}{dx} \right| = \frac{2E_0(1 - 0.5\eta - 0.4\eta^2)}{\sqrt{\pi}\Delta R_m(1 + \operatorname{erf}\chi)} \exp \left[- \left(\frac{x}{\Delta R_m} - \chi \right)^2 \right], \quad (3)$$

где η — коэффициент обратного рассеяния, $\chi = R_m/\Delta R_m$, R_m — положение максимума энергетических потерь, ΔR_m — его полуширина [2].

При экспериментальном изучении зависимостей КП образцов CdS(Se) от энергии электронов (спектров КП) в режиме постоянного тока пучка наблюдалось снижение кратности изменения тока через образец с увеличением дозы облучения (рис. 1), в то время как у образцов с добавками PbS спектр КП практически не изменился вплоть до набора максимальной дозы.

Деградацию образцов CdS(Se) естественно связать с изменением τ в ходе облучения, поскольку в (1) G не зависит от поглощенной дозы, а сильное изменение μ под действием облучения представляется сомнительным. Поскольку измерение спектров КП производится в

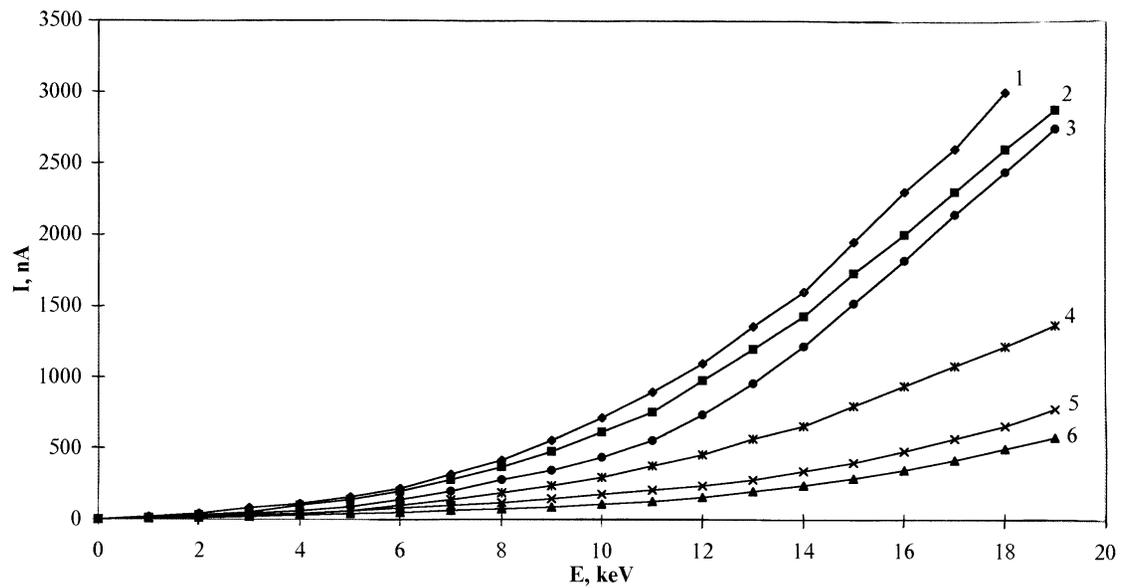


Рис. 1. Зависимости тока, наведенного электронным пучком, от энергии облучающих электронов: 1, 2 — образец CdS(Se)-PbS (1 — до облучения, 2 — после облучения дозой $D = 4.4 \cdot 10^9$ rad), 3–6 — образец CdS(Se) (3 — до облучения, 4 — $D = 8.7 \cdot 10^8$ rad, 5 — $D = 2.6 \cdot 10^9$ rad, 6 — $D = 4.4 \cdot 10^9$ rad). Спектры снимались при малых токах пучка (10^{-9} A) в перерывах между сериями облучений на той же установке, на которой проходил набор дозы при большем токе (10^{-6} A).

вакууме непосредственно в ходе облучения, то рассчитанное из них τ изменяется только в результате электронного облучения и не зависит от воздействия атмосферных газов, влажности и других факторов.

Уравнения (1)–(3) позволяют определить из спектров КП τ в ”приповерхностных” и ”объемных” слоях или усредненное τ по всему объему образца. Проведенный нами расчет с использованием экспериментальных данных (рис. 1) и формул (1)–(3) дал нам для образцов CdS(Se) уменьшение среднего τ при облучении от значения $1.63 \cdot 10^{-4}$ s ($D = 0$) до $3.45 \cdot 10^{-5}$ s ($D = 4.47 \cdot 10^9$ rad). Для образцов CdS(Se)–PbS изменение τ при наборе максимальной дозы составило менее 7%: с $1.96 \cdot 10^{-4}$ s ($D = 0$) до $1.84 \cdot 10^{-4}$ s ($D = 4.47 \cdot 10^9$ rad).

Кроме статических характеристик нами также исследовалось влияние электронного облучения на кинетику фототока по изменению времени фотоответа $\tau_{\text{ф}}$. Измерения проводились при освещении белым светом, интенсивность которого модулировалась с помощью механического модулятора по синусоидальному закону в диапазоне частот от 0 до 2 kHz (рис. 2). По частотным характеристикам определялись времена фотоответа [3].

При сравнении $\tau_{\text{ф}}$ внимания заслуживают следующие факты: 1) $\tau_{\text{ф}}$ образцов с PbS получались всегда меньшими или равными $\tau_{\text{ф}}$ образцов без PbS ($3.3 \cdot 10^{-4}$ – $1.17 \cdot 10^{-3}$ s); 2) после облучения электронами допороговых энергий $\tau_{\text{ф}}$ образцов с PbS уменьшались в 3 раза (с $1.1 \cdot 10^{-3}$ до $3.35 \cdot 10^{-4}$ s). Для образцов без PbS, напротив, были получены более стабильные значения $\tau_{\text{ф}}$: до облучения — $1.25 \cdot 10^{-3}$ s, после облучения — $8.65 \cdot 10^{-4}$ s, т.е. изменение составляло не более 25%.

Наблюдаемое уменьшение времени жизни τ в CdS(Se) естественно связать с увеличением в результате облучения числа дефектов (глубоких уровней), являющихся центрами рекомбинации. Неизменность τ в образцах с PbS означает, что в них дефектообразование не влияет на фотопроводимость, т.е. дефекты либо не образуются вовсе, либо образуются в узкозонных включениях, не участвующих в фотопроводимости, либо скапливаются в этих включениях (или на границах раздела фаз), образуясь во всем объеме полупроводника. На наш взгляд, последний вариант наиболее вероятен, и наблюдаемое на отдельных партиях образцов с PbS увеличение чувствительности после облучения (эффект малых доз) можно объяснить как сток дефектов, возникших при изготовлении образца, в узкозонную фазу. Этот сток может происходить за счет радиационно-стимулированной диффузии (РСД). Так, облучение

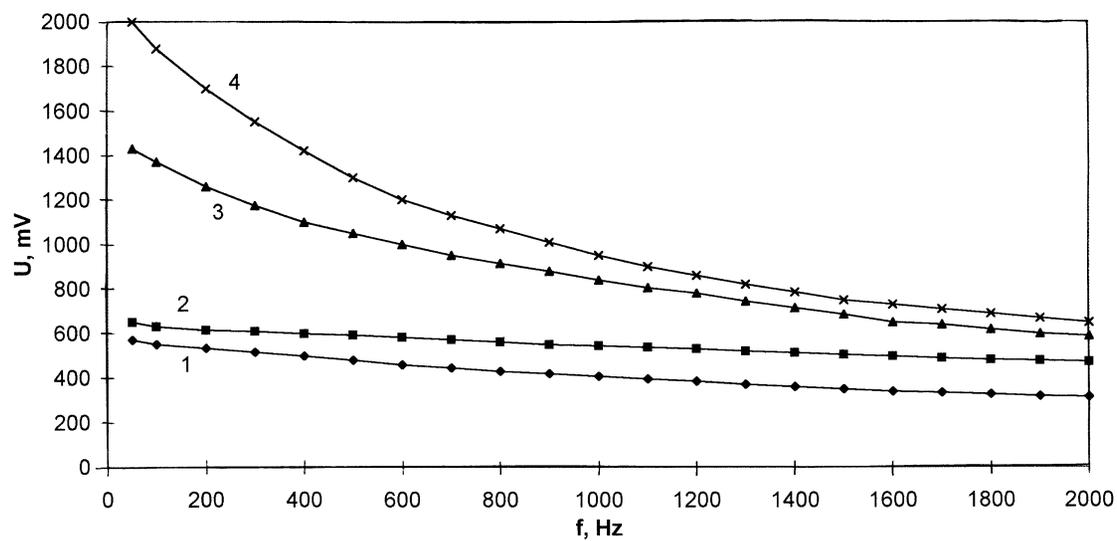


Рис. 2. Зависимости величины фотоотклика от частоты модуляции света для пленок двух составов: 1, 2 — “чистый” CdS(Se); 3, 4 — CdS с добавлением PbS. Зависимости 1 и 3 — после облучения электронным пучком; 2 и 4 — до облучения.

CdS γ -лучами с мощностью дозы 250 rad/s (что значительно ниже используемой нами) приводит к коэффициенту диффузии дефектов $D = 10^{-12} - 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{s}$ [4]. При этом средний кристаллит (расстояние 0.2–0.4 μm) дефект проходит за время порядка 10^2 s , что значительно меньше времени облучения.

Одним из наиболее вероятных механизмов РСД в широкозонных полупроводниках, на наш взгляд, является механизм Θ -вспышки [5], поскольку рекомбинация идет через локальные уровни и энергия, выделяемая в единичном акте рекомбинации, достаточно велика. В узкозонных же включениях, напротив, Θ -вспышки малоэффективны (межзонная рекомбинация с малой выделяемой энергией), поэтому следует ожидать, что скорость РСД в узкозонной компоненте значительно ниже, чем в широкозонной. В результате диффундирующие дефекты "застревают" в узкозонных включениях и широкозонная матрица очищается от них. Движению дефектов к включениям может способствовать также направленное движение к ним носителей ("электронный ветер") [6], возникающее при освещении гетерофазного ФП [7].

Концентрация мелких ловушек в CdS(Se) после облучения практически не изменяется, поскольку малое уменьшение времени фотоответа

$$\tau_{\phi} = \tau(1 + n_t/n) = \tau + Cn_t, \quad (4)$$

где n_t — концентрация электронов на ловушках, $C = \tau/n = \tau/(\tau G) = \text{const}$ при постоянном токе пучка (см. (1)), — может быть обусловлено уменьшением одного только τ , причем τ_{ϕ} будет изменяться слабее, чем τ (поскольку n_t обычно превышает n). Это и наблюдается экспериментально на образцах CdS(Se). Уменьшение τ_{ϕ} в CdS(Se)–PbS при неизменном τ означает уменьшение n_t , что также может быть обусловлено стоком центров прилипания в узкозонную фазу.

Таким образом, из проведенных исследований можно сделать вывод о том, что добавление в исходную шихту PbS существенно повышает деградационную стойкость статических характеристик, не оказывая при этом стабилизирующего воздействия на кинетику фотоотклика. Анализ изменения времени жизни и времени фотоответа показывает, что приведенные экспериментальные данные объясняются моделью гетерофазного полупроводника [7], узкозонная фаза которого служит стоком возникающих при облучении дефектов (хотя, как это следует и из [7], роль субмикронных включений PbS, по-видимому, не сводится только к функции геттера).

Список литературы

- [1] *Фотопроводящие пленки (типа CdS)* / Под ред. З.И. Кирьяшкиной, А.Г. Рокаха. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1979. 192 с.
- [2] *Аброян И.А., Андронов А.Н., Титов А.И.* Физические основы электронной и ионной технологии. М.: Высш. школа, 1984. 320 с.
- [3] *Рывкин С.М.* Фотоэлектрические явления в полупроводниках. М.: Физматгиз, 1963. 494 с.
- [4] *Вавилов В.С., Кив А.Е., Ниязова О.Р.* Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках. М.: Наука, 1981. 368 с.
- [5] *Болтакс Б.И.* Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках. Л.: Наука, 1972. 384 с.
- [6] *Фикс В.Б.* Ионная проводимость в металлах и полупроводниках. М.: Наука, 1969. 295 с.
- [7] *Роках А.Г.* // Письма в ЖТФ. 1984. Т. 10. В. 13. С. 820–823.