

06;12

Эффект усиления фототока в гетероструктуре $\text{In}_2\text{O}_3\text{--GaSe}$

© С.И. Драпак, З.Д. Ковалюк

Черновицкое отделение института проблем материаловедения

НАН Украины

E-mail: chimsp@unicom.cv.ua

Поступило в Редакцию 16 января 2001 г.

Описан экспериментально обнаруженный эффект возникновения усиления фототока в гетероструктуре $\text{In}_2\text{O}_3\text{--GaSe}$ с локализацией плоскости барьера перпендикулярно слоям базового полупроводника. При обратном смещении $U = 10\text{ V}$ величина коэффициента усиления достигала $M \approx 82$, а абсолютное значение токовой чувствительности $30\text{--}32\text{ A/W}$. На основе исследования вольт-амперных характеристик определен механизм токопереноса через диэлектрик, неизбежно возникающий на поверхности моноселенида галлия при изготовлении структур методом пульверизации. Сделано предположение об изменении механизма проводимости при переносе плоскости барьера из параллельной в перпендикулярную к слоям GaSe.

Исследованию ряда явлений, которые возникают в гетеропереходе (ГП) $\text{In}_2\text{O}_3\text{--GaSe}$ благодаря введению тонкого слоя диэлектрика Ga_2O_3 , посвящены работы [1,2]. В настоящем сообщении впервые представлены результаты исследования гетероструктуры, обладающей значительным внутренним усилением фототока, в которой роль тонкого диэлектрика выполняет собственный окисел Ga_2O_3 с проводимостью, близкой к собственной.

Приготовление структуры заключалось в нанесении на плоскость, параллельную оси C , монокристаллического селенида галлия p -типа

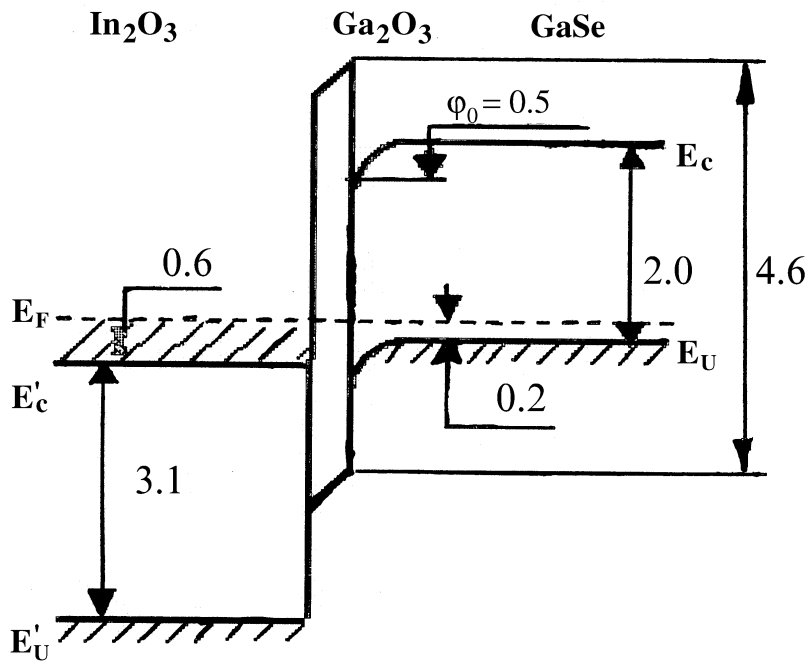


Рис. 1. Зонная диаграмма гетероструктуры $\text{In}_2\text{O}_3\text{-GaSe}$. Все величины указаны в электрон-вольтах.

($p \cong 10^{16} \text{ cm}^{-3}$) (в том случае, когда GaSe вырастает блочным, образцы с зеркальными поверхностями спайности вышеупомянутой ориентации попадают довольно часто), путем пульверизации спиртового раствора хлорного индия при температуре $t = 400^\circ\text{C}$ слоя прозрачного проводящего окисла In_2O_3 с сильно вырожденным газом свободных электронов ($n \cong 10^{20} \div 10^{21} \text{ cm}^{-3}$). Площадь барьерного контакта составляла $8 \div 10 \text{ mm}^2$. В качестве омических контактов использовался контактол на основе серебряной пасты.

Качественный вид зонной диаграммы гетероструктуры представлен на рис. 1. Величина поверхностного изгиба зон φ_0 в селениде галлия определялась из вольт-фарядных характеристик (ВФХ) [3], положение

уровня Ферми — по формуле [4]:

$$E_F - E_V = kT \ln(N_V/p),$$

где E_F , E_V — энергетическое положение уровня Ферми и валентной зоны базового полупроводника соответственно, k — постоянная Больцмана, T — абсолютная температура, p — равновесная концентрация основных носителей тока, а эффективная плотность состояний в валентной зоне N_V определялась из наклона ВФХ. Параметры зонной структуры и глубина залегания уровня Ферми в In_2O_3 взяты из работы [5]. Здесь учтено также присутствие тонкого слоя Ga_2O_3 , который неизбежно возникает на поверхности моноселенида галлия при описанной методике изготовления гетероструктуры. Его толщина контролировалась лазерным эллипсометром ЛЭМ-2 и составляла для исследованных образцов $4 \div 5$ nm. Поскольку чувствительность к свету исследуемой структуры находилась в спектральном диапазоне $0.48\text{--}0.64$ μm , следует ожидать, что основную роль в усилении фототока будут играть фотоэлектроны, генерируемые светом в базовом полупроводнике. Отметим, что в данном случае присутствие собственного окисла моноселенида галлия играет паразитическую роль, поскольку приводит к уменьшению поверхностного изгиба зон [1], что, в свою очередь, сказывается на уменьшении толщины запирающего слоя и уменьшении вклада неосновных носителей заряда в общий ток через барьер при обратном смещении.

Для определения механизма протекания тока через диэлектрик измерялись вольт-амперные характеристики (ВАХ) в прямом и обратном направлениях. В первом случае прямое смещение создавалось как с помощью внешнего источника питания (темновая ВАХ), так и, с целью избежать искажения ВАХ из-за влияния нелинейности сопротивления базовой области полупроводника, путем возбуждения носителей заряда, при больших уровнях освещения. В последнем случае использовался GaP светодиод с $\lambda_{\text{max}} = 560$ nm. Измерение зависимости фототока от напряжения холостого хода U_{xx} , которое для исследуемых структур достигало $0.70\text{--}0.75$ V при освещенности образцов светом мощностью ≈ 100 mW/cm², представляет собой аналог прямой ветви ВАХ, с той разницей, что отображает протекание электронных процессов непосредственно в барьерной области реальной структуры [1]. Такая методика измерения была особенно актуальна при исследовании ГП с плоскостью барьера, размещенной параллельно слоям GaSe (перпендикулярно

оси C) [1,2], из-за сильного влияния последовательного сопротивления на вид ВАХ. В нашем случае результаты измерений, полученные в обоих случаях, оказались идентичными. В прямом направлении при напряжении $U > 0.5$ V ВАХ описывалась выражением $\lg I = f(U^{1/2})$, характерным как для эмиссии Шоттки, так и для термоэлектронной ионизации Пула-Френкеля. Однако рассчитанный угловой коэффициент засвидетельствовал, что механизмом токопереноса через диэлектрик в прямом направлении в исследуемых структурах является эмиссия Шоттки [6]. В обратном направлении начальный участок ВАХ был линейным, а при $|U| > 1$ V ток экспоненциально возрастал с напряжением. Такая зависимость характерна для туннельного прохождения носителей через барьер, образованный диэлектриком.

Обратная ветвь темновой ВАХ гетероструктуры представлена на рис. 2, *a* (кривая 1). Она не имеет четкого насыщения, что свойственно гетеропереходам. В области больших обратных смещений $|U| = 12-16$ V наблюдается слабо выраженная S -образность, характерная для теплового пробоя. Обратные ветки ВАХ структуры при освещении (рис. 2, *a*, кривые 2-4) типичны для МТДП структур с внутренним усилением фототока [7], а о величине коэффициента усиления ($M \approx 82$) можно судить по результатам измерения зависимости фототока I_p от мощности излучения P (рис. 2, *b*). Характеристика измерялась при освещении структуры желтым светодиодом на длине волны света $0.56 \mu\text{m}$. Частота модуляции излучения составляла 1 kHz, сопротивление нагрузки 100Ω . На структуру подавалось обратное напряжение 10 V. Из рисунка видно, что зависимость $I_p(P)$ близка к линейной в широком диапазоне освещенностей, а абсолютное значение токовой чувствительности $R = I_p/P \approx 30-32$ A/W, что значительно превышает значения, характерные для кремниевых фотодиодов без внутреннего усиления фототока, и достигает аналогичной величины для структуры $\text{In}_2\text{O}_3-\alpha\text{-Si:H-Si}$, в которой реализовано значительное усиление фототока при обратном смещении $U = 6$ V [8,9].

Следует отметить, что при фактической идентичности поведения ВФХ (отсутствие влияния поверхностных состояний на вид характеристик как на высоких, так и на низких частотах; влияние последовательного сопротивления на напряжение отсечки в координатах $C^{-2} = f(U)$ при определении поверхностного изгиба зон φ_0) и ВАХ при прямом смещении (одинаковый наклон ВАХ в полулогарифмической системе координат) для структур, у которых плоскость барьера была создана

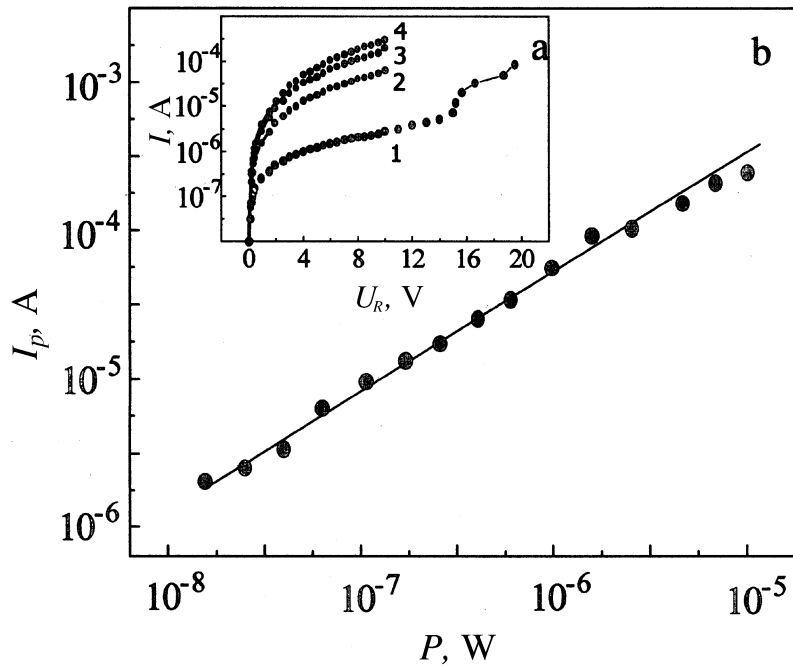


Рис. 2. Обратные ветки ВАХ гетероструктуры $\text{In}_2\text{O}_3\text{-GaSe}$ при комнатной температуре, *a*: 1 — темновая ветка; 2 — при освещенности мощностью 1.5; 3 — 7; 4 — 13 мВт; *b* — зависимость фототока I_p от мощности падающего излучения.

параллельно [1,2] и перпендикулярно слоям базового полупроводника, усиление фототока реализуется только в последних. Причина такого различия, очевидно, состоит в анизотропии свойств моноселенида галлия. Во-первых, прохождение тока в области пространственного заряда для структур с плоскостью барьера, размещенной параллельно слоям GaSe (\perp оси C), описывается в рамках диффузионной теории. В нашем случае благодаря анизотропии электрических свойств моноселенида галлия (подвижность основных носителей заряда μ вдоль слоев в 6 раз, а эффективная масса дырок m_p^* в 4 раза больше, чем поперек [10]) критерий справедливости диффузионной теории $W \gg 2\varphi_0 l/kT$ [10], где W —

толщина запорного слоя, φ_0 — контактная разность потенциалов, l — длина свободного пробега носителей заряда, не выполняется, поскольку обе части неравенства являются практически равными величинами. Отсюда можно сделать вывод, что при переносе плоскости барьера из параллельной в перпендикулярную слоям GaSe вполне вероятно изменение механизма проводимости. Во-вторых, при одинаковой толщине подложки диффузионная длина для структур, у которых плоскость барьера размещена перпендикулярно слоям, только за счет разности величин времени жизни неосновных носителей τ , определенных из кинетических характеристик ($\tau \sim 10^{-6}$ и 10^{-4} s для случая локализации барьера параллельно и перпендикулярно слоям соответственно), на порядок больше, чем у структур с барьером, размещенным параллельно слоям базового полупроводника. Таким образом, если в гетероструктурах с барьером, размещенным параллельно слоям, большая часть носителей заряда, генерированных светом в толще GaSe, рекомбинирует, то для исследуемых структур вероятность того, что все носители тока, генерированные светом, примут участие в процессе переноса тока через барьер, значительно возрастает. Подтверждением этого могут служить результаты измерения темновых статических характеристик транзисторов $\text{In}_2\text{O}_3\text{-GaSe-In}_2\text{O}_3$ и $\text{In}_2\text{O}_3\text{-GaSe-InSe}$, включенных по схеме с общей базой, где коллектором служил первый переход $\text{In}_2\text{O}_3\text{-GaSe}$, созданный перпендикулярно, а эмиттером — второй ($\text{GaSe-In}_2\text{O}_3$ или GaSe-InSe), локализованный параллельно слоям базового полупроводника. Как известно, общий характер этих зависимостей аналогичен обратной ветви ВАХ диода, так как коллекторный переход включен в обратном направлении, а инжекция электронов из эмиттера является в некотором смысле аналогом генерации светом фотоносителей в диоде с той разницей, что электронам предстоит преодолеть некоторое расстояние по полю эмиттерного перехода, т.е. в нашем случае перпендикулярно слоям GaSe. В этом случае коэффициент усиления коллекторного перехода, к которому было приложено обратное напряжение $U = 10$ V, составлял $M \approx 1.14\text{--}1.23$ для обеих видов транзисторов при токе эмиттера $250 \mu\text{A}$, что свидетельствует о достаточно существенном влиянии рекомбинации в процессах токопереноса перпендикулярно слоям GaSe. Дальнейшее увеличение напряжения эмиттер–база приводило к сильному нагреванию образцов и разрушению омических контактов.

Таким образом, исследуемая гетероструктура может быть использована не только в качестве поляризационно-чувствительного датчика [11], но и как высокоэффективный фотодиод для спектрального диапазона 0.48–0.64 μm .

Авторы выражают благодарность руководителю компании Antena Development, Torrance, Ca., USA В.А. Манассону за проявленный интерес и обсуждение результатов этой работы.

Список литературы

- [1] Катеринчук В.Н., Ковалюк З.Д., Манассон В.А. // ФТП. 1987. Т. 21. № 11. С. 2094–2096.
- [2] Drapak S.L., Katerinchuk V.N., Kovalyuk Z.D., Manasson V.A. // Phys. Stat. Sol. 1989. V. (a) 115. P. K35–K37.
- [3] Goodman A.M. // J. Appl. Phys. 1963. V. 34. N 2. P. 329–338.
- [4] Бонч-Бруевич В.Л., Калашиников С.Г. // Физика полупроводников. М.: Наука, 1965. 688 с.
- [5] Манассон В.А., Малик А.И., Товстюк К.Д. // ФТП. 1984. Т. 18. № 12. С. 2121–2124.
- [6] Орешкин П.Т. // Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высш. школа, 1977. 448 с.
- [7] Вуль А.Я., Саченко А.В. // ФТП. 1983. Т. 17. № 8. С. 1361–1376.
- [8] Баранюк В.Б., Комиссаров Г.П., Манассон В.А., Шустер Э.М. // ФТП. 1988. Т. 22. № 4. С. 733–735.
- [9] Драпак С.И., Катеринчук В.Н., Ковалюк З.Д., Манассон В.А. // Препринт № 5. Киев: ИПМ, 1989. 18 с.
- [10] Landolt-Bornstein. Numerical Data and Functional Relationships in Science and Technology New Ser. Group III: Crystal and Solid State Physics. V. 17, sv. F / Ed. by O. Madelung. Berlin: Springer, 1983. 562 p.
- [11] Manasson V.A., Kovalyuk Z.D., Drapak S.I. et al. // Electronic Letters. 1990. V. 26. N 10. P. 664.