

Исследование спектров фоточувствительности гетероперехода n -GaAs–As₂Se₃

© И.П. Аржанухина, К.П. Корнев, Ю.В. Селезнев

Калининградский государственный университет,
236041 Калининград, Россия

(Получена 5 мая 1997 г. Принята к печати 30 июня 1998 г.)

Представлены результаты исследования спектральных характеристик фотоотклика гетеропереходов n -GaAs–аморфная пленка As₂Se₃ при разной толщине пленки халькогенидного стеклообразного полупроводника. Получены формулы для расчета: доли света, поглощенной в халькогенидном стеклообразном полупроводнике; доли света, поглощенной в GaAs при учете многократных отражений от границ раздела в исследованной структуре; а также их отношения. Проводятся анализ поглощения света в структуре и модель формирования фотоотклика гетероструктуры. Показано хорошее соответствие экспериментальных и расчетных данных.

Введение

В большинстве работ, посвященных исследованию гетеропереходов, описываются свойства гетеропереходов, полученных на основе кристаллических веществ. Такие гетеропереходы уже нашли применение при создании радиотехнических элементов, фотоприемников, инжекционных лазеров [1,2]. В последнее время ведется поиск новых материалов и концепций, которые могут быть использованы при создании гетероструктур, в том числе и гетеропереходов с использованием аморфных пленок [3–5]. Исследование гетеропереходов кристалл–аморфная пленка представляет интерес, поскольку с изменением состава пленки появляется возможность целенаправленно изменять свойства таких гетеропереходов. В данной работе излагаются результаты исследования спектров фоточувствительности гетеропереходов эпитаксиальный n -GaAs–аморфная пленка As₂Se₃.

Изготовление образцов и методика исследований

Для получения спектров фоточувствительности гетероперехода n -GaAs–As₂Se₃ изготавливались структуры Al– i -GaAs– n -GaAs–As₂Se₃–Al. Гетеропереходы были изготовлены на основе монокристаллических образцов собственного арсенида галлия, на поверхности которого был выращен эпитаксиальный слой n -типа проводимости. Концентрация носителей в эпитаксиальном слое для всех образцов была порядка $1 \cdot 10^{22} \text{ м}^{-3}$. Для получения гетероперехода на эпитаксиальный слой GaAs методом термического распыления в вакууме наносился слой халькогенидного стеклообразного полупроводника (ХСП) As₂Se₃. При изготовлении гетеропереходов варьировалась толщина слоя ХСП от 0.3 до 5 мкм. На поверхность пленки ХСП методом вакуумного напыления последовательно наносились полупрозрачный и толстый слои алюминия. Перед напылением толстого слоя центральная часть образца перекрывалась маской, и

под ней оставался полупрозрачный слой алюминия, который служил одновременно и собирающим электродом и окошком, через которое освещалась гетероструктура. С обратной стороны образца на подложку из собственного GaAs, для создания контакта, также наносился толстый слой алюминия.

Методика исследования спектров фоточувствительности, а также измерительная установка, которая использовалась для их исследования, описаны в опубликованной ранее работе [6]. Измерения проводились как при положительном, так и при отрицательном напряжении на собирающем электроде (коллекторе). Величина напряжения U_C могла изменяться от 0 до 20 В.

Полученные результаты

Исследование спектральных характеристик фотоотклика (СХФ) было произведено для гетероструктур, изготовленных с различной толщиной пленки ХСП. Были исследованы образцы с толщиной пленки 0.3, 1 и 5 мкм. Изменение толщины пленки позволило менять область максимальной чувствительности гетероструктуры. На рис. 1 приведены СХФ гетероструктуры при различной толщине пленки ХСП; зависимости получены при $U_C = 1 \text{ В}$ и нормированы на величину максимального фотоотклика. Для гетероструктур с толщиной пленки ХСП, равной 0.3 мкм, максимум СХФ лежит в области энергии квантов света 1.4 эВ. При толщине пленки 1 мкм на СХФ наблюдаются два пика — при $h\nu = 1.4$ и 1.85 эВ. На третьей кривой, полученной для гетероструктуры с толщиной пленки ХСП 5 мкм, пик, связанный с фотопроводимостью арсенида галлия практически не наблюдается, и основной вклад в фотопроводимость дает As₂Se₃. Максимум фоточувствительности в этом случае лежит в области 1.9 эВ (рис. 1). То, что при толщине пленки триселенида мышьяка $d = 1 \text{ мкм}$ СХФ формируется как за счет фотопроводимости GaAs, так и за счет фотопроводимости As₂Se₃, убедительно иллюстрируется кривыми, полученными при больших напряжениях на собирающем электроде (рис. 2). На приведенных на

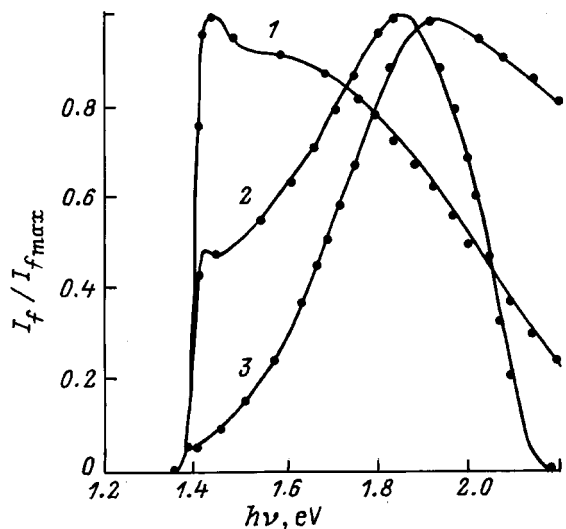


Рис. 1. СХФ гетероструктуры $n\text{-GaAs}$ –триселенид мышьяка при различной толщине пленки ХСП d , мкм: 1 — 0.3, 2 — 1, 3 — 5.

этом рисунке кривых отчетливо видны два пика: один — при энергии квантов света $h\nu = 1.4$ эВ (фотопроводимость GaAs); второй — при энергии квантов света $h\nu = 1.95$ эВ (фотопроводимость As_2Se_3).

Исследования СХФ, проведенные при различной толщине пленки СХП, можно сопоставить с результатами расчетов, учитывающих поглощение в слоях полупроводников с многократными отражениями от границ раздела слоев, образующих гетероструктуру. Результаты расчетов показывают, что для толщины пленки As_2Se_3 $d = 0.3$ мкм заметное поглощение в триселениде мышьяка возникает при энергии квантов света $h\nu > 1.9$ эВ, следовательно, в области, для которой получены СХФ (рис. 1), основную роль в формировании фотопроводимости будет играть поглощение в GaAs. Кроме того, при небольших напряжениях на коллекторе существенную роль будут играть рекомбинационные процессы, а поэтому особенности СХФ будут размыты, что и наблюдается в действительности. Для образцов с толщиной пленки ХСП $d = 1$ мкм переход от поглощения в GaAs к поглощению в As_2Se_3 происходит при $h\nu > 1.7$ эВ, и поэтому на СХФ должны наблюдаться и область, связанная с фотопроводимостью GaAs, и область, связанная с фотопроводимостью As_2Se_3 , что действительно видно из экспериментально полученных СХФ. Для толстых пленок ($d = 5$ мкм) поглощение в ХСП становится преобладающим при еще меньших энергиях квантов света, что должно приводить к более выраженной области фотопроводимости As_2Se_3 на СХФ гетероструктуры. Кроме того, увеличение толщины пленки As_2Se_3 приводит к увеличению ее сопротивления, и при больших толщинах сопротивление пленки становится определяющим в суммарном сопротивлении гетероструктуры. Поэтому вклад фотопроводимости GaAs в СХФ становится малым, хотя

область фотопроводимости GaAs на СХФ наблюдается (рис. 1, кривая 3). Особенности, обсужденные выше, еще более выражены на кривых, полученных при больших напряжениях на коллекторе, когда разделение носителей осуществляется внешним полем, и рекомбинационные процессы уже не столь сильно изменяют вид СХФ.

При рассмотрении зависимости СХФ гетероструктур от напряжения кривые пересчитывались к одинаковой интенсивности падающего света во всем использованном диапазоне. Нормированные кривые, полученные при отрицательной полярности на собирающем электроде, приведены на рис. 2. Кривые получены при толщине пленки ХСП $d = 1$ мкм. Из приведенных кривых видно, что при напряжениях -0.5 и -1 В в области энергий квантов света $1.3\text{--}1.4$ эВ наблюдается резкое нарастание фототока, эти кривые имеют плечо при $h\nu = 1.4$ эВ, и затем нарастание фототока идет медленнее. При напряжениях

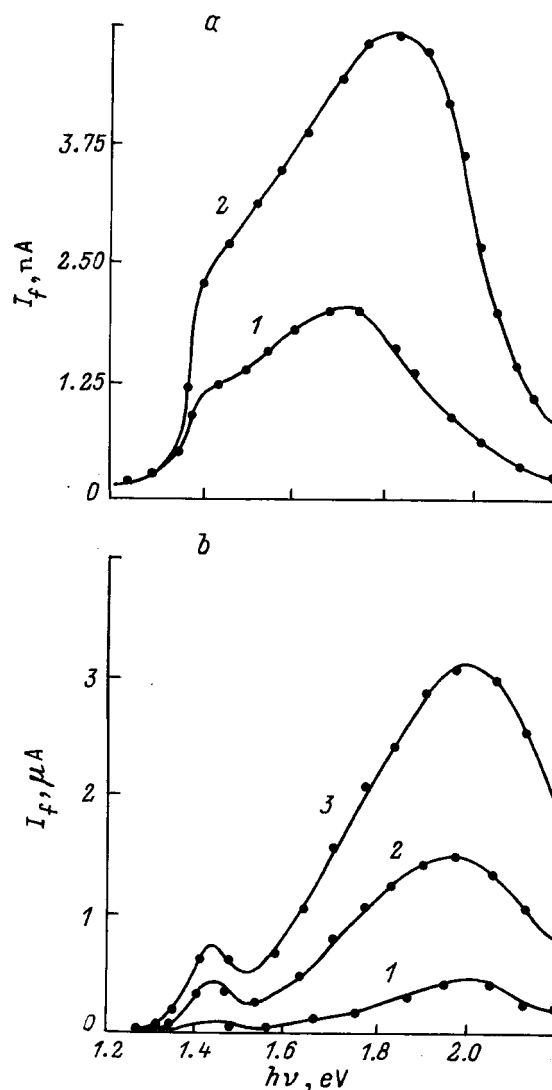


Рис. 2. СХФ гетероструктуры $n\text{-GaAs}$ –триселенид мышьяка при отрицательной полярности собирающего электрода U_c , В: а) 1 — -0.5 , 2 — -1 ; б) 1 — -4 , 2 — -10 , 3 — -20 .

от -4 до -20 В на собирающем электроде особенность при $h\nu = 1.43$ эВ представляет собой уже не плечо, а пик, который явно выделен относительно остальной кривой. Основным максимумом на приведенных кривых при малых напряжениях наблюдается при энергиях квантов света $h\nu = 1.75-1.8$ эВ, при этом с ростом напряжения пик сдвигается в область больших энергий квантов света, и при напряжениях от -4 до -20 В пик расположен при энергии $h\nu = 1.97$ эВ. Для всех исследованных случаев при отрицательной полярности собирающего электрода фототок соответствует движению положительных зарядов к собирающему электроду.

Для всех СХФ, полученных при нулевом потенциале и положительной полярности собирающего электрода, фототок соответствует движению электронов к коллектору, а дырок к толстому слою алюминия на задней границе гетероструктуры. Так как подвижность дырок в ХСП существенно больше подвижности электронов, в данном случае именно движение дырок будет определять направление тока через гетероструктуру. На рис. 3 приведены СХФ, полученные при напряжении от 0 до 4 В на коллекторе. Кривые измерены при толщине пленки ХСП $d = 1$ мкм. При малых положительных напряжениях (0.5, 1 В) величина фототока больше, чем величина фототока при соответствующих значениях напряжения, но для отрицательной полярности. При напряжениях выше 4 В фототок при отрицательной полярности коллектора существенно больше фототока при положительной полярности.

При отсутствии внешнего напряжения на гетероструктуре, а также при малых напряжениях ($U_C \sim 1$ В) на СХФ наблюдается резкое нарастание фототока в области энергии квантов света $1.3 < h\nu < 1.4$ эВ и плечо при $h\nu = 1.4$ эВ. При дальнейшем увеличении энергии квантов фототок медленно нарастает и достигает максимума при $h\nu = 1.8$ эВ. В этом диапазоне напряжений величина фототока при изменении напряжения изменяется слабо.

При увеличении напряжения на собирающем электроде до 3 В величина фототока резко нарастает (примерно в 30 раз). Дальнейший рост напряжения также сопровождается значительным увеличением фототока. Кроме увеличения фототока рост напряжения сопровождается изменением формы СХФ. При больших напряжениях увеличивается отношение фототока в максимуме к фототoku в районе плеча при $h\nu = 1.4$ эВ. Положение основного максимума с ростом напряжения изменяется. Если при малых напряжениях на коллекторе максимум наблюдается при $h\nu = 1.8$ эВ, то при больших напряжениях он смещается в область энергий квантов $h\nu = 1.9-1.95$ эВ. Такое смещение аналогично смещению максимума, которое наблюдалось при отрицательной полярности.

Возникновение фототока при отсутствии внешнего напряжения, приложенного к гетероструктуре, объясняется тем, что фотогенерированные носители разделяются полями вблизи барьеров, возникающих в гетероструктуре на границах разделов, контактирующих веществ. Подтверждением этого является тот факт, что

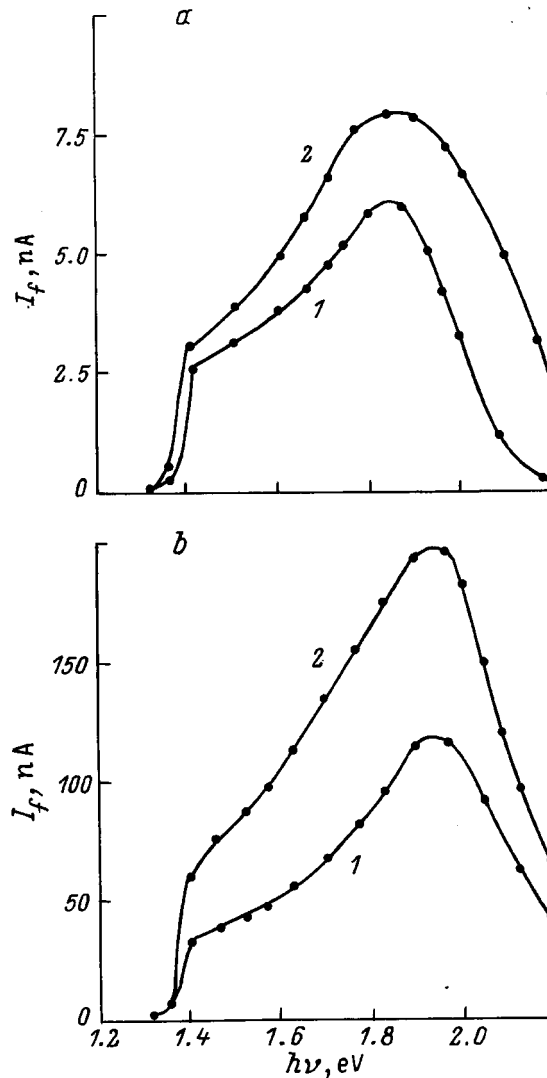


Рис. 3. СХФ гетероструктуры n -GaAs-германий мышьяка при положительной полярности собирающего электрода U_C , В: а) 1 — 0, 2 — 1; б) 1 — 3, 2 — 4.

при небольших положительных напряжениях ($U_C \sim 1$ В) величина фототока мало отличается от величины фототока при отсутствии внешнего напряжения (рис. 3). С дальнейшим ростом приложенного к коллектору положительного напряжения фототок резко возрастает. В этом случае разделение фотоносителей осуществляется внешним полем. Таким образом, пока внешнее поле мало по сравнению с полями вблизи границ раздела в гетероструктуре, направление и величина тока в основном определяется внутренними барьерами. Дополнительным подтверждением сказанного является то, что при малых отрицательных напряжениях на коллекторе фототок существенно меньше, чем при соответствующих значениях положительных напряжений. При этом следует отметить, что нарастание максимума фототока с ростом отрицательного напряжения на коллекторе происходит быстрее, чем при увеличении положительного (рис. 2 и рис. 3).

Так, при напряжении -4 В на коллекторе максимальное значение фототока примерно в 2.5 раза больше, чем при напряжении $+4\text{ В}$. Поскольку максимальное значение фототока лежит в области, определяемой фотопроводимостью пленки ХСП, это легко объясняется, так как основными носителями в ХСП являются дырки. В случае отрицательного напряжения на коллекторе фотогенерированные дырки сразу из ХСП попадают на собирающий электрод. В GaAs подвижность электронов больше подвижности дырок, следовательно, рекомбинационные процессы будут играть меньшую роль, а поэтому фототок будет больше. В области энергии квантов света $h\nu = 1.4\text{ эВ}$, когда свет поглощается не в ХСП, а в GaAs, величины фототока при напряжениях -4 и $+4\text{ В}$ на коллекторе практически одинаковы (рис. 3). В этом случае асимметрия подвижности дырок и электронов в As_2Se_3 и GaAs не будет играть решающей роли, поскольку в GaAs электроны могут двигаться как в сторону толстого слоя алюминия (" $-$ " на коллекторе), так и в сторону пленки ХСП (" $+$ " на коллекторе), где в дальнейшем могут рекомбинировать с дырками.

В области энергий квантов света $1.0 < h\nu < 1.4\text{ эВ}$ при отрицательной полярности коллектора наблюдается фототок, которого нет при положительной полярности. Наличие этого фототока можно объяснить фотоэмиссией дырок из толстого слоя Al на задней границе гетероструктуры. При отрицательном напряжении на коллекторе фотоэмиттированные дырки могут через GaAs и As_2Se_3 попадать на коллектор. Явление фотоэмиссии дырок наблюдалось при изучении потенциального барьера на границе Al-GaAs в работе [7].

Заключение

В работе предлагается модель формирования фотоотклика гетероструктуры. Показано, что вид СХФ гетероструктуры определяется толщиной аморфной пленки As_2Se_3 . При толщине пленки 0.3 мкм и меньше СХФ в основном формируется за счет поглощения в GaAs, при толщине пленки 1 мкм вклад в СХФ дают и As_2Se_3 и GaAs, при толщине пленки 5 мкм и более основную роль играет поглощение в As_2Se_3 .

Получено, что при положительной полярности на алюминиевом электроде со стороны GaAs форма СХФ практически не зависит от величины напряжения. При отрицательной полярности с ростом напряжения величина пика, связанного с фотопроводимостью GaAs, возрастает. При этом нарастание фототока при отрицательной полярности с увеличением напряжения происходит быстрее, чем при положительной полярности.

При отсутствии внешнего напряжения, приложенного к гетероструктуре, и при малых положительных напряжениях ($U_C < 1\text{ В}$) разделение фотогенерированных носителей происходит на барьерах, существующих в гетероструктуре. При больших напряжениях разделение носителей осуществляется внешним полем.

Список литературы

- [1] Л. Милнс, Д. Фойхт. *Гетеропереходы и переходы металл-полупроводник* (М., 1975) с. 12.
- [2] А.В. Аншон, И.А. Карпович, А.А. Сафронов. *Изв. вузов. Физика*, **29**, № 8, 112 (1986).
- [3] V. Venkataraman. *Curr. Sci. (India)*, **67**, № 11, 855 (1994).
- [4] М.А. Иову, М.С. Иову, А.А. Симашкевич, Д.И. Циуляну, С.Д. Шутов. *Матер. конф. "Аморфные полупроводники-80"* (Кишинев, 1980) с. 120.
- [5] А.М. Andriesh, Е.А. Akimova, V.V. Bivol, E.G. Khancevskaya, M.S. Iovu, S.A. Malkov, V.I. Verlan. *Int. J. Electron.*, **77**, № 3, 339 (1904).
- [6] К.П. Корнев. Деп. ВИНТИ 1986. N8021-B8.
- [7] А.С. Кочемировский, К.П. Корнев. *Тез. докл. Всес. конф. "Стеклообразные полупроводники"* (Л., 1985) с. 80.

Редактор В.В. Чалдышев

Study of photosensitivity spectra of $n\text{-GaAs-As}_2\text{Se}_3$ heterojunction

I.P. Arjanukhina, K.P. Kornev, U.V. Seleznev

Kaliningrad State University,
236041 Kaliningrad, Russia

Abstract In this paper the results of investigations of spectral photoresponse characteristics of heterojunctions $n\text{-GaAs-As}_2\text{Se}_3$ with different chalcogenide glassy semiconductor film thickness are given. There are some formulas for calculation of a light fraction absorbed in chalcogenide glassy semiconductor; of a light fraction absorbed in GaAs, taking into consideration multiple reflections from investigated structure; and their relationship. The analysis of the structure light absorption is given, and the model of formation of heterostructure photoresponse is presented in this article. The experimental results and theoretical calculations show agreement.