

Спектральные зависимости фототока короткого замыкания для полученных изотипных структур приведены на рисунке, *а*. Видно, что с увеличением $t_{0x} > 10$ мин происходит трансформация спектрального контура фоточувствительности. Длинноволновый край экспоненциальный и описывается урбаховским параметром $\sigma = 1.3-1.7$ (300 К), что отвечает прямой структуре энергетических зон кристалла. Смещение длинноволнового края и абсолютного максимума фоточувствительности в длинноволновую область, усиление коротковолнового спада фототока $i_m/i_{1.2эВ}$ и снижение ширины спектрального контура фоточувствительности на полувысоте $\Delta h\nu_{1/2}$ с ростом t_{0x} (см. рисунок, *а* и таблицу) связаны с удалением активной области структур от освещаемой поверхности, в результате чего возрастает роль поверхностной рекомбинации возбуждаемых коротковолновым светом неравновесных носителей заряда.

Влияние времени термообработки на фоточувствительность изотипных структур представлено на рисунке, *б*. Главной закономерностью установленной зависимости является быстрый спад фоточувствительности при временах термообработки более 50 мин. Аналогичная особенность имеет место и при получении анизотипных структур. Поэтому в случае структур с изотипным переходом она может быть также связана с увеличением концентрации собственных дефектов типа V_{Cu} и, собственно, степени компенсации доноров в активной области структур, что и сопровождается понижением фоточувствительности.

Таким образом, метод термического окисления кристаллов *n*-типа проводимости позволяет получить $n-n^+$ -структуры с максимальной абсолютной токовой фоточувствительностью до 10 мА/Вт при столь низких выпрямлении и фотонапряжении холостого хода (см. таблицу). Очевидно, что оптимизация процесса может вскрыть технологические возможности существенного улучшения выпрямляющих свойств изотипных структур на основе $CuInSe_2$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Mitchell K. W. // Proc. IX E. C. Photovolt. Solar Energy Confer. Freiburg, 1989. P. 292—293.
- [2] Медведкин Г. А., Бежимбетов Р. Н., Макарова Т. Л., Смирнова А. Д., Соколова В. И. // ЖТФ. 1987. Т. 57. В. 5. С. 960—964.
- [3] Медведкин Г. А., Рудь Ю. В., Таиров М. А. // ФТП. 1989. Т. 23. В. 5. С. 869—872.
- [4] Медведкин Г. А., Амбразьявичус Г. А., Яковенко А. А. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1987. № 2. С. 81—87.
- [5] Cahen D., Noufi R. // Appl. Phys. Lett. 1989. V. 54. N 6. P. 558—560.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Получено 22.07.1991
Принято к печати 22.10.1991

ФТП, том 26, вып. 3, 1992

ОПТИЧЕСКИЕ ГЕТЕРОКОНТАКТЫ НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК $CuInSe_2$

Константинова Н. Н., Магомедов М. А., Рудь В. Ю., Рудь Ю. В.

Одним из эффективных приемов в создании фоточувствительных структур утвердился в последние годы метод посадки на прямой оптический контакт двух различных полупроводников $[1-4]$. При этом оптический контакт формируют между двумя сколотыми или сколотой и полированной механически, а затем химически плоскостями монокристаллов. Наиболее высокие параметры достигаются в структурах на основе слоистых полупроводников, у которых поверхности скола обладают низкой концентрацией поверхностных состояний $[1,2]$. Физические свойства

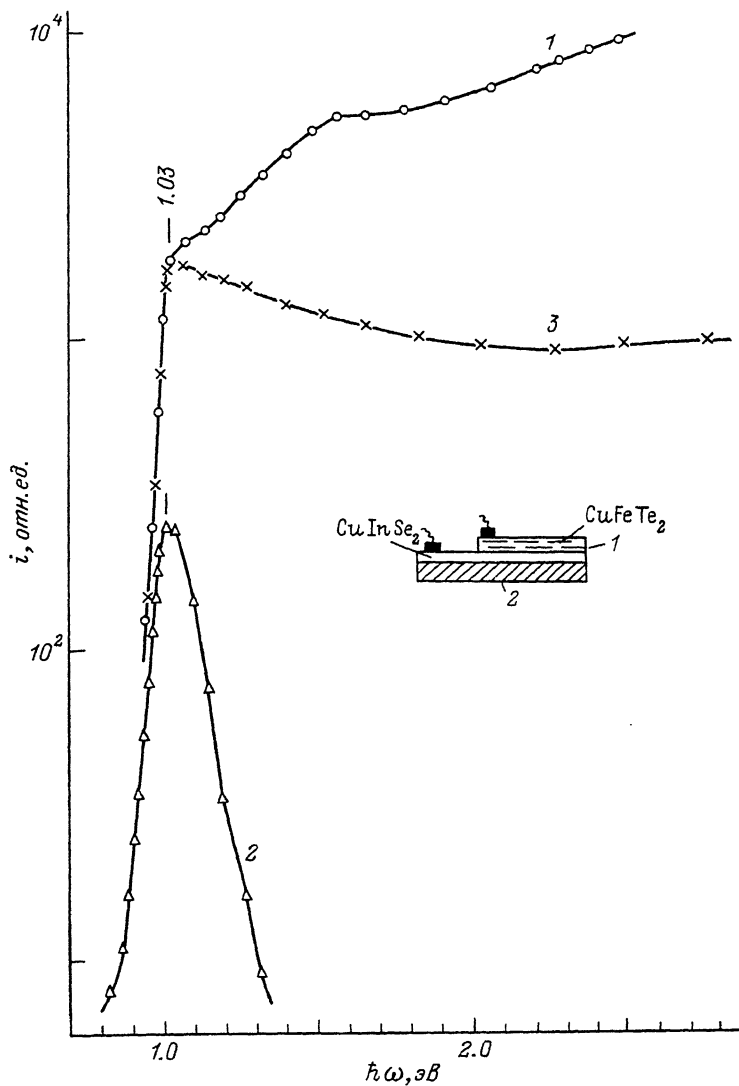


Рис. 1. Спектральные зависимости фоточувствительности гетероструктуры n -CuFeTe₂- n -CuInSe₂ (на вставке указана конструкция; 1 — освещение в торец, 2 — освещение со стороны CuInSe₂ и фотопроводимости пленки n -CuInSe₂ (3).

$T = 300$ К; спектральное разрешение ≈ 1 мэВ; d , мкм: CuInSe₂ — 1, CuFeTe₂ — 100.

оптического контакта с использованием тонких поликристаллических пленок еще не изучались. В данной работе представлены результаты первых исследований фотоэлектрических свойств оптических контактов сколов двух типичных представителей слоистых полупроводников InSe и CuFeTe₂ [5] с поверхностью тонких поликристаллических пленок CuInSe₂, применяемых в преобразователях солнечного излучения [6].

Для получения структур использовались выращенные методом вакуумной сублимации на нагретые подложки из оптического стекла пленки n -CuInSe₂ с зеркальной поверхностью 2×2 см и толщинами 1–2 мкм. Концентрация и холловская подвижность электронов в них при $T = 300$ К составляли $n \approx 10^{16} - 10^{17}$ см⁻³ и $U_n \approx 5 - 50$ см²/В·с соответственно. Монокристаллы n -InSe ($n \approx 10^{14}$ см⁻³, $U_n \approx 30$ см²/В·с) и n -CuFeTe₂ ($n \approx 5 \cdot 10^{21}$ см⁻³, $U_n \approx 5$ см²/В·с)

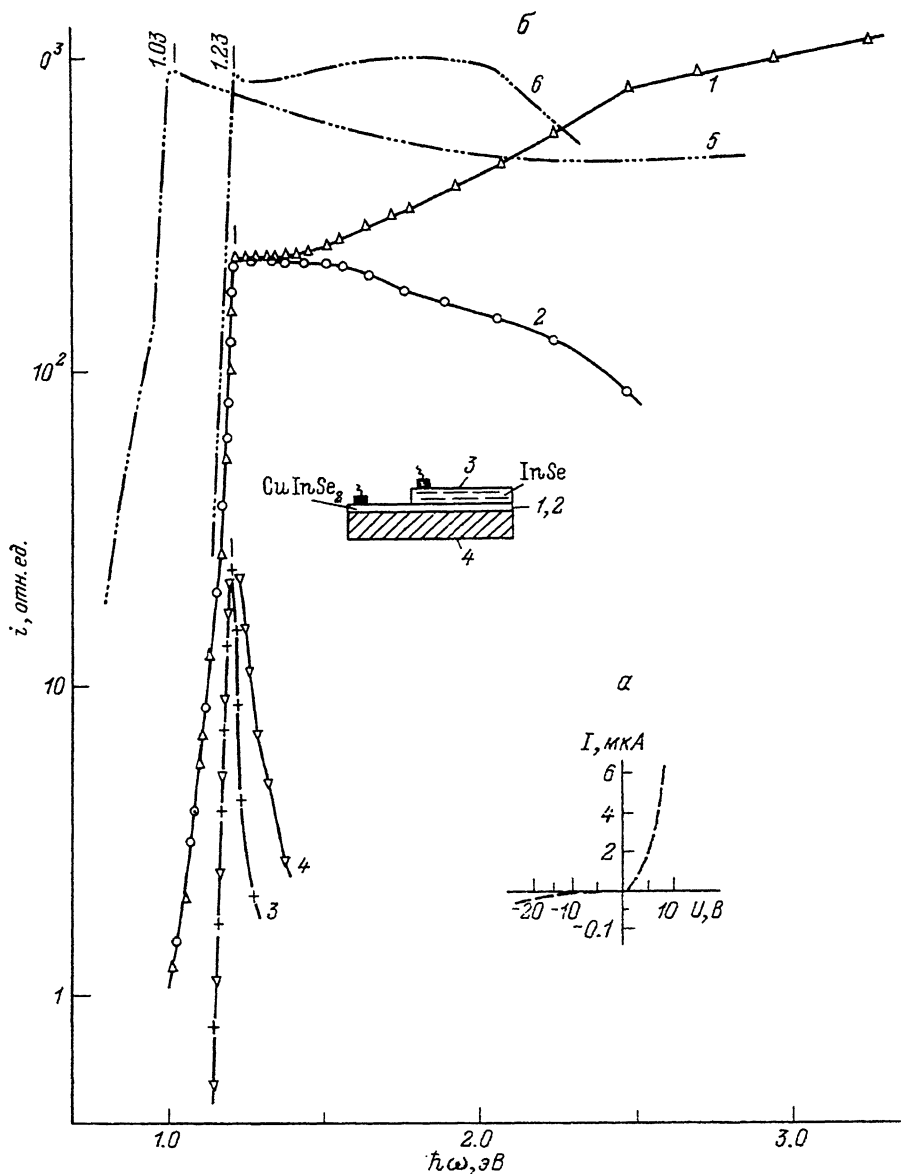


Рис. 2.

a — стационарная вольт-амперная характеристика гетероструктуры n -InSe— n -CuInSe₂ (положительная полярность отвечает InSe), *б* — спектральные зависимости фоточувствительности гетероструктуры n -InSe— n -CuInSe₂ (на вставке дана конструкция структуры; 1, 2 — освещение в торец, 3 — со стороны InSe, 4 — со стороны CuInSe₂) и фотопроводимости ее составляющих (5 — CuInSe₂, 6 — InSe). $T = 300$ К; спектральное разрешение ≈ 1 нэВ; *d*, мкм: CuInSe₂ — 1, InSe — 75; 1 — образец 5, 2 — образец 7.

выращивались методами направленной кристаллизации расплава, состав которого был близок к стехиометрии этих соединений. Поверхностные размеры сколотых пластинок слоистых веществ составляли 3×3 мм, а их толщина изменялась в интервале 50—150 мкм. Омическим контактом к компонентам создававшихся гетеропереходов служил металлический индий. Схемы полученных структур приведены на рис. 1 и 2.

Стационарные вольт-амперные характеристики всех полученных структур имеют выраженный диодный характер, причем их прямые ветви всегда соответствуют положительному потенциалу на CuInSe_2 . Коэффициент выпрямления при напряжениях $U \approx 1$ В находится на уровне 10. Все изученные структуры обнаруживают фоточувствительность, которая доминирует при их освещении в торец, когда излучение поглощается непосредственно в активной области гетероперехода. Спектры фоточувствительности типичной гетероструктуры в сравнении со спектром фотопроводимости поликристаллической пленки $n\text{-CuInSe}_2$, входящей в качестве одной из пар в ее состав, представлены на рис. 1. Как следует из рис. 1, спектр фоточувствительности оптического гетероконтакта в длинноволновой области при $\hbar\omega < E_g^{\text{CuInSe}_2} = 1.03$ эВ (300 К) экспоненциальный, не зависит от геометрии освещения и характеризуется крутизной $S = 50\text{—}70$ эВ⁻¹, что типично для фотоактивного поглощения в прямозонном полупроводнике CuInSe_2 (кривая 3). Совпадение длинноволнового края фоточувствительности гетероконтакта (кривая 1) и фотопроводимости пленки CuInSe_2 (кривая 3) свидетельствует о том, что процесс фоточувствительности гетероперехода определяется фотоактивным межзонным поглощением в CuInSe_2 . Последнее согласуется с результатами оценки на основе параметров контактирующих полупроводников, согласно которой активная область гетероструктуры практически полностью локализуется в CuInSe_2 . Поэтому в случае освещения гетеропереходов со стороны CuInSe_2 (кривая 2) спектр фоточувствительности имеет вид кривой с максимумом вблизи $E_g^{\text{CuInSe}_2}$, а при $\hbar\omega > 1.03$ эВ наступает резкий спад фоточувствительности из-за удаления области поглощения излучения от активной области гетероперехода. В случае освещения гетероконтактов $n\text{-CuInSe}_2\text{—}n\text{-CuFeTe}_2$ в торец (кривая 1) фоточувствительность не обнаруживает коротковолнового спада, причем ее спектральный контур соответствует спектру полного поглощения пленок $n\text{-CuInSe}_2$. Последнее обстоятельство позволяет считать, что квантовая эффективность процесса фотопреобразования на оптическом гетероконтакте в области 1—2.5 эВ сохраняется практически постоянной.

В то же время важно отметить, что наблюдаемый в спектрах фотопроводимости пленок $n\text{-CuInSe}_2$ (кривая 3) коротковолновый спад фототовета при $\hbar\omega > 1.03$ эВ, который свидетельствует о влиянии поверхностной рекомбинации, исчезает после приведения поверхности этой пленки без какой-либо дополнительной обработки в оптический контакт со сколом узкозонного полупроводника $n\text{-CuFeTe}_2$. Эта закономерность позволяет сделать вывод о достаточном совершенстве оптического гетероконтакта поликристаллических пленок $n\text{-CuInSe}_2$ со слоистым полупроводником $n\text{-CuFeTe}_2$ в отношении процессов фотопреобразования в актуальной для солнечных элементов спектральной области. Максимальная вольтовая фоточувствительность таких структур при освещении в торец обычно составляет ~ 2 В/Вт при $T = 300$ К.

$n\text{-CuInSe}_2\text{—}n\text{-InSe}$.

На рис. 2, а представлена типичная стационарная вольт-амперная характеристика одной из структур. Все гетероструктуры обнаруживают выпрямление, причем пропускному направлению отвечает положительный потенциал внешнего смещения на InSe . Коэффициент выпрямления при $U \approx 2$ В составляет $\sim 10^2$.

Все изготовленные гетероконтакты такого типа обладают высокой вольтовой фоточувствительностью, которая максимальна при освещении в торец и достигает $5 \cdot 10^5$ В/Вт при $T = 300$ К. Спектры фоточувствительности типичных гетероконтактов в зависимости от геометрии освещения (кривые 1—4) и в сравнении со спектрами фотопроводимости каждой из пар гетероструктуры (кривые 5 и 6) приведены на рис. 2, б. Как и в случае предыдущей гетероструктуры, в длинноволновой области спектральные зависимости фоточувствительности (кривые 1—4) экспоненциальны, определяются фотоактивным поглощением в InSe (кривая 6) и не зависят от геометрии освещения. Тот факт, что фоточувствительность

гетероконтакта определяется межзонным поглощением в InSe , объясняется соотношением электрических параметров контактирующих полупроводников, из которого следует, что активная область таких структур практически полностью локализуется в InSe . Использование в гетероконтакте пленок CuInSe_2 с приближающимся к InSe удельным сопротивлением сопровождалось увеличением фоточувствительности гетеропереходов в области собственного поглощения CuInSe_2 . Тот факт, что при освещении гетероконтактов со стороны CuInSe_2 или InSe спектральные характеристики оказываются узкоселективными (рис. 2, б, кривые 3 и 4), обусловлен сильным поверхностным поглощением излучения с энергией фотонов $h\omega > 1.2$ эВ вдали от области объемного заряда гетероструктуры. Действительно, при освещении в торец (рис. 2, б, кривые 1 и 2) спектральные зависимости фоточувствительности становятся широкополосными с четкой особенностью на краю, характерной и для исходного кристалла InSe [7]. Различие спектральных зависимостей фоточувствительности полученных гетеропереходов в коротковолновой области при $h\omega > 1.23$ эВ демонстрирует роль совершенства поверхности поликристаллических пленок $n\text{-CuInSe}_2$ в процессах фоточувствительности. Очевидно, что обнаруженная зависимость спектров коротковолновой фоточувствительности легко и быстро получаемого оптического контакта слоя InSe с поверхностью тонкой пленки CuInSe_2 может быть использована в целях экспрессной диагностики ее совершенства. Следует также отметить, что, как и в случае $n\text{-CuInSe}_2-n\text{-CuFeTe}_2$, отсутствие коротковолнового спада в спектрах фоточувствительности гетеропереходов $n\text{-CuInSe}_2-n\text{-InSe}$ (рис. 2, а, кривая 1) демонстрирует возможность достижения в данной системе достаточно совершенной в отношении фотоэлектрических явлений гетерограницы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бакуменко В. Л., Чишко В. Ф. // ФТП. 1977. Т. 11. В. 10. С. 2000—2002.
- [2] Бакуменко В. Л., Ковалюк З. Д., Курбатов Л. Н., Тагаев В. Г., Чишко В. Ф. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 2. С. 374—377.
- [3] Мехтиев Н. М., Рудь Ю. В., Салаев Э. Ю. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 8. С. 1566—1570.
- [4] Мехтиев Н. М., Рудь Ю. В., Салаев Э. Ю. // МЭ. 1985. Т. 14. В. 3. С. 271—273.
- [5] Вайполин А. А., Прочухан В. Д., Рудь Ю. В., Скорюкин В. Е. // Изв. АН СССР. ЖНМ. 1984. Т. 20. В. 4. С. 578—581.
- [6] Copper Indium Diselenide for Photovoltaic Applications / Ed. by T. J. Coutts, L. L. Kazmerski, S. Wagner. Amsterdam, 1986. P. 640.
- [7] Ананьина Д. Б., Бакуменко В. Л., Курбатов Л. Н., Чишко В. Ф. // ФТП. 1976. Т. 10. В. 12. С. 2373—2375.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе РАН
Санкт-Петербург

Получено 20.08.1991
Принято к печати 22.10.1991

ФТП, том 26, вып. 3, 1992

ТВЕРДОФАЗНОЕ ЛАЗЕРНОЕ ЛЕГИРОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$

Вирт И. С., Кузьма М. С., Шерегий Е. М., Шкумбатюк П. С.

Легирование монокристаллов $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$ — основной способ получения слоев с заданным типом проводимости для создания приборов инфракрасной техники. В последнее время с этой целью широко применяется лазерная технология [1–3]. Об эффекте твердотельного лазерного легирования полупроводниковых материалов на примере монокристаллов кремния сообщалось в [1]. В работе [2] пред-