

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В КОРОТКИХ ФОТОРЕЗИСТОРАХ НА ОСНОВЕ InP : Fe

Дерингас А., Добровольскис З., Гореленок А. Т.,
Мокина И. А., Шмидт Н. М.

Создано электрооптическое устройство на основе фемтосекундного кольцевого струйного лазера с пикосекундным временным разрешением и исследована кинетика фотопроводимости в фоторезисторах из InP : Fe. Фотопроводимость возбуждалась фемтосекундными оптическими импульсами в фоторезисторах с различными контактами, удельным сопротивлением, методом изготовления. Установлено, что времена релаксации фотовозбужденной плазмы в фоторезисторах на основе InP : Fe с удельным сопротивлением $\rho \sim 10^8$ Ом·см составляют ~ 20 , а для InP с максимальной концентрацией Fe — ~ 15 пс.

Введение. В настоящее время для измерений коротких оптических импульсов электрических стробирующих ключей, импульсных генераторов электрических импульсов с большой частотой повторения и т. д. [1] требуются фоторезисторы с очень малым (< 50 пс) временем восстановления. Известно, что такие быстрые фоторезисторы можно создать на основе аморфных [2] или подэргнутых ионной бомбардировке [3] полупроводников с временами восстановления ~ 10 пс. Однако такие фоторезисторы обладают низкой фоточувствительностью из-за малой подвижности носителей тока. В работе [4] показано, как, не меняя фоточувствительности, можно создать фоторезисторы с очень быстрой частью на спаде фототока, используя вынос фотовозбужденных носителей тока в контакты сильным электрическим полем. Такой эффект наблюдается в области электрических полей, при которых дрейфовые скорости носителей тока достигают максимума. Поэтому такие фоторезисторы могут быть использованы только в детекторном режиме, т. е. как генераторы они не могут работать. В слабых электрических полях эффект выноса может проявиться в фоторезисторах лишь тогда, когда их длина не превышает долей микрометра. Такой эффект наблюдался в работе [5], где в фоторезисторе длиной 0,2 мкм из поликристаллического кремния на сапфире было получено время исчезновения фотовозбужденной плазмы 27 пс. Однако прикладываемые напряжения к таким фоторезисторам очень малы. Получить быстрое восстановление темнового сопротивления можно также в случае быстрой рекомбинации носителей на поверхности [6] или в приконтактных областях [7].

В настоящей работе установлено, что в фоторезисторах на основе InP : Fe при $\rho \sim 10^8$ Ом·см фотовозбужденные носители тока рекомбинируют с временем ~ 20 пс. Этот вывод сделан после исследования при различных электрических полях кинетики фотопроводимости фоторезисторов с различными контактами и удельным сопротивлением, но с одинаковыми геометрией и поверхностной обработкой.

Образцы и методика измерения

Фоторезисторы изготавливались из двух монокристаллов фосфида индия, выращенных методом Чохральского и легированных железом, — кристалла 495 с удельным сопротивлением $\rho \sim 10^8$ и кристалла 156 с $\rho \sim 10^7$ Ом·см. Об-

Кристалл	№ образца	Толщина, мкм	Контакты	Условия
495 —10 ⁸ Ом·см	A ₁	100	Au+Ge	Металлизация после утоньшения
	A ₂	400	(Au+Ge)—Cr—(Au+Ge)	Утоньшение после металлизации
	A ₃	100	(Au+Ge)—Cr—(Au+Ge)	
	A ₄	400	Au+Ge	
	156 —10 ⁷ Ом·см	A ₅	100	Au+Ge
B ₁		100	Au+Ge	Металлизация после утоньшения
B ₂		400	(Au+Ge)—Cr—(Au+Ge)	Утоньшение после металлизации
B ₃		100	(Au+Ge)—Cr—(Au+Ge)	
B ₄		400	Au+Ge	Утоньшение после металлизации
B ₅	100	Au+Ge		

разды имели компланарную геометрию контактов, обеспечивающую согласование волнового сопротивления с 50-омной микрополосковой линией, одинаковую длину $L=5$ мкм и ширину 250 мкм. Для изготовления омических контактов были использованы две системы металлизации (Au+Ge) и (Au+Ge)—Cr—(Au+Ge) и исследовались образцы толщиной 100 и 400 мкм. Параметры образцов представлены в таблице. Образцы монтировались в микрополосковый 50-омный модуль с электрооптическим кристаллом из танталата лития размером $8 \times 0.7 \times 0.25$ мм (рис. 1) при помощи серебряной пасты.

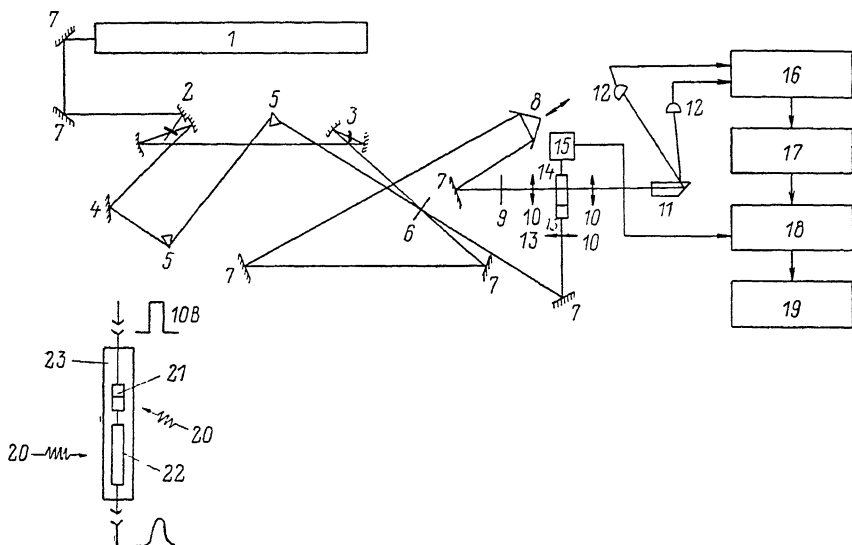


Рис. 1. Схема фемтосекундного лазера, электрооптической установки и микрополоскового модуля.

1 — аргонный лазер, 2 — модуль усиливающего красителя, 3 — модуль модулирующего красителя, 4 — «глухое» зеркало, 5 — призмы компенсации фазовой модуляции, 6 — выходное полупрозрачное зеркало, 7 — диэлектрическое зеркало, 8 — линия задержки, 9 — поляризатор, 10 — объектив, 11 — кристалл ДКДП, 12 — фотоприемник, 13 — исследуемый образец, 14 — электрооптический кристалл танталата лития, 15 — источник импульсного питания, 16 — дифференциальный усилитель, 17 — селективный усилитель, 18 — синхронный детектор, 19 — самописец, 20 — фемтосекундный световой импульс, 21 — исследуемый образец, 22 — электрооптический кристалл, 23 — металлический держатель.

Фотопроводимость возбуждалась при помощи излучения кольцевого двухструйного фемтосекундного лазера на красителях, работающего в режиме синхронизации мод сталкивающихся световых импульсов [8]. Схема фемтосекундного лазера показана на рис. 1. Фемтосекундный лазер на красителях с пассивной синхронизацией мод состоит из следующих узлов: лазера накачки 1, модуля раствора усиливающего красителя родолин-6Ж в этиленгликоле 2, модуля раствора поглощающего красителя ДОДСИ в этиленгликоле 3, «глухого» зеркала 4, выходного зеркала $R=97\%$ 6. С целью компенсации фазовой модуляции, возникающей в струях растворов красителей, в резонаторе были размещены стеклянные призмы компенсации 5. В итоге были получены сле-

дующие характеристики генерируемого излучения: выходная мощность — 5 мВт, длительность светового импульса — 70 фс, длина волны излучения — 610—620 нм, частота повторения световых импульсов — 100 МГц. Ввиду того что фемтосекундный лазер работает в режиме сталкивающихся световых импульсов в кольцевом резонаторе, на выходе генерировались разнесенные по углу два световых импульса. Один из этих импульсов использовался для облучения исследуемого фоторезистора, который включен в режиме ключа в электрооптическую микрополосковую линию. В ней после освещения образца начинается распространяться короткий электрический импульс, отражающий кинетику фотопроводимости при работе в детекторном режиме ($R_{05} \gg z_0$, где R_{05} — сопротивление образца при освещении, z_0 — волновое сопротивление измерительной линии). Кинетика фотопроводимости, т. е. форма электрического импульса, измерялась методом электрооптического стробирования, впервые использованным Вальдманисом [9]. Суть данного метода следующая: исследуе-

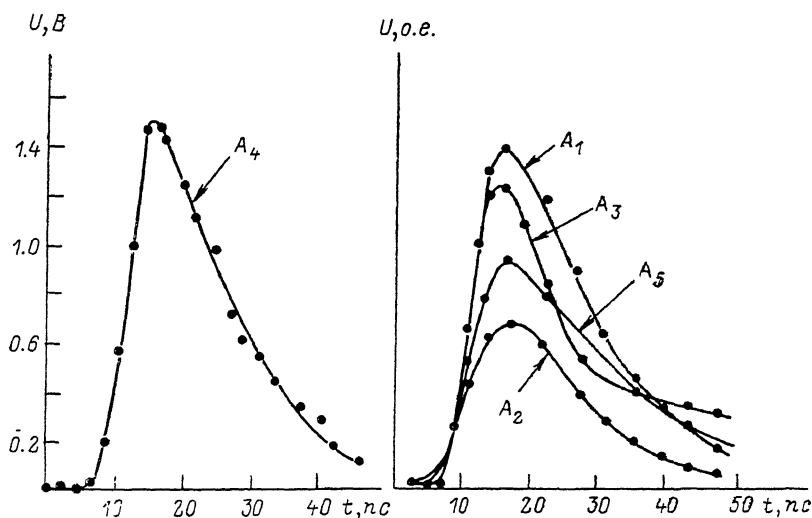


Рис. 2. Импульсы фотоотклика образцов типа А с различными толщинами активной области и контактами.

мый электрический импульс распространяется по линии передачи, в которой в качестве диэлектрика используется электрооптический кристалл, и индуцирует двулучепреломление этого кристалла, а просвечивающий (зондирующий электрооптический кристалл) меняет из-за этого поляризацию светового импульса в случае, когда в данной точке электрооптического кристалла совпадают по времени электрический и зондирующий световой импульсы. Величина изменения поляризации пропорциональна амплитуде электрического поля в электрооптическом кристалле. Поэтому, просвечивая вторым лазерным лучом в данной точке передающей линии в различные моменты времени и находя величину изменения поляризации, можно определить форму и амплитуду электрического импульса. Временная разрешающая способность данного метода в основном определяется длительностью и геометрическими размерами зондирующего импульса и качеством передающей линии.

В качестве зондирующего светового импульса использовался второй лазерный луч. Он через оптическую линию задержки 8 и поляризатор 9, пройдя электрооптический кристалл танталата лития 14, менял свою поляризацию и поступал на кристалл ДКДП 11. При помощи данного кристалла зондирующий импульс разделялся на две компоненты, каждая из которых регистрировалась кремниевыми фоторезисторами 12. Полученные электрические сигналы с фоторезисторов 12 подавались на дифференциальный усилитель 16, селективный усилитель 17 и после этого на синхронный детектор 18, с которого результаты измерений выводились на самописец 19. Чувствительность данного устройства 20 мВ с временным разрешением 3 пс.

На рис. 2 показаны временные зависимости фототока, измеренные на фоторезисторах, изготовленных из кристалла *A* при меандровом импульсном питании с частотой 15 кГц и амплитудой 10 В. Измерения проводились на расстоянии 200—300 мкм от активной области фоторезистора во избежание искажений формы электрического импульса из-за дисперсии в линии передачи при распространении этого импульса по ней. Полученный передний фронт порядка 5 пс, по-видимому, определяется следующей причиной: из-за малой оптической энергии, генерируемой лазером, необходимо было проводить фокусировку всей оптической энергии в пятно, равное длине активной области фоторезистора 5 мкм. Ширина активной области *H* фоторезистора и толщина электрооптического кристалла *N* равны 250 мкм, поэтому при облучении активной области такого малого размера фронт генерируемого электрического импульса в линии передачи образуется за время $w\sqrt{\epsilon}/c \approx 5$ пм, где ϵ — диэлектрическая проницаемость танталата лития, c — скорость света.

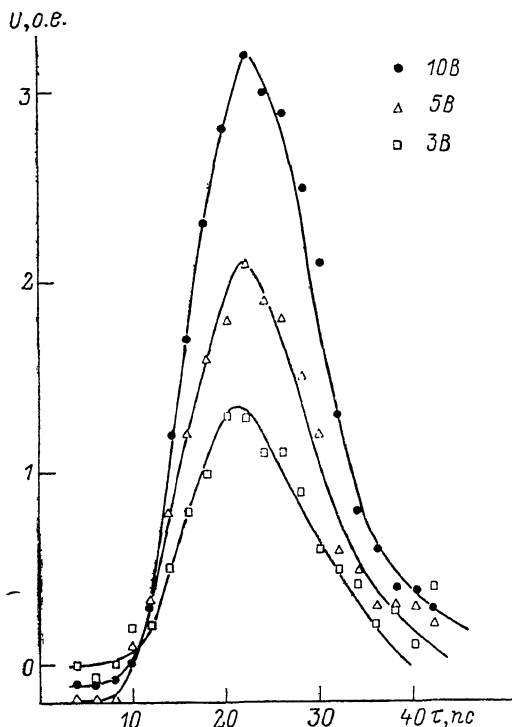


Рис. 3. Импульс фотоотклика образца *A*₄.

фотовозбужденных носителей тока сильным электрическим полем [4], рекомбинацией фотовозбужденных носителей тока через глубокие центры, создаваемые железом [1] или возникающие в результате генерации собственных дефектов в объеме образца, в области контактов [3] в процессе их изготовления или в приповерхностной области при ее химической обработке и под воздействием мощных фемтосекундных световых импульсов в процессе измерения [6]. Нами были проведены экспериментальные исследования для выяснения основных причин наблюдаемого эффекта.

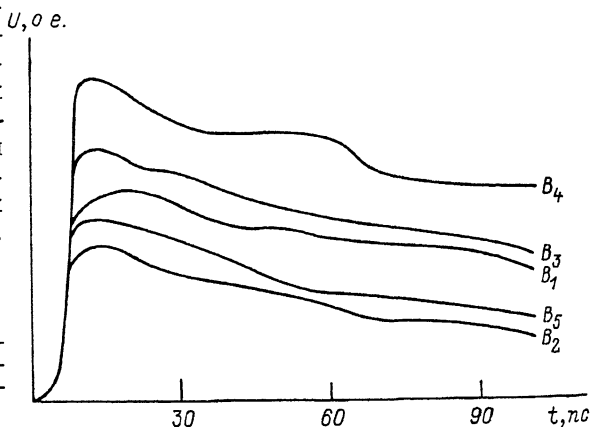


Рис. 4. Импульсы фотоотклика образцов типа *B* с различными толщинами активной области и контактами.

В случае выноса фотовозбужденной плазмы электрическим полем кинетика спада фотопроводимости сильно зависит от величины приложенного напряжения. При слабом электрическом поле, т. е. в случае InP менее 10 кВ/см, отклонение от закона Ома малое, движение фотовозбужденной плазмы будет амбиплярным и очень медленным, а при большом электрическом поле, когда дрейфо-

вая скорость достигает максимума и время диэлектрической релаксации возрастает, начинается вынос неравновесных носителей тока в контакты с пиковым значением дрейфовой скорости. На рис. 3 представлены кривые кинетики фототока, измеренные в слабом и сильном электрических полях для образцов A_4 . Полуширина импульса фотоотклика на полувысоте практически не зависит от величины электрического поля. Это свидетельствует об отсутствии влияния выноса даже в таком коротком фоторезисторе.

На рис. 2 представлены кривые кинетики фототока образцов, которые имеют различные контакты и толщины активной области. Однако форма спада и τ для всех образцов из этого кристалла A почти одинаковы. Поэтому можно предполагать, что обработка поверхности и способ формирования контактов слабо влияют на кинетику фототока. Это подтверждают также и полученные временные зависимости фотопроводимости для образцов с аналогичными контактами и геометрией из кристалла B , представленные на рис. 4. Как видно из данного рисунка, форма спада и увеличивающееся τ не зависят от контактов и геометрии.

Однако сравнение между собой временных зависимостей фотопроводимости образцов типа A и B (рис. 2 и 4) показывает, что они существенно различаются даже для образцов с одинаковой обработкой поверхности и одинаковыми контактами, полученными в одном процессе.

Поскольку измерения проводились при одной и той же мощности светового импульса, можно полагать, что наблюдаемая разница обусловлена тем, что образцы типа A и B получены из слитков с разным удельным сопротивлением (для A $\rho \sim 10^8$, для B $\rho \sim 10^7$ Ом·см). Масс-спектрометрические исследования этих образцов показали, что они различаются между собой только по концентрации атомов железа (на ~ 1 порядок).

Это позволяет предполагать, что малые значения τ в образцах типа A обусловлены рекомбинацией фотовозбужденных носителей через уровни, создаваемые атомами железа.

Такой вывод находится в хорошем соответствии с выводами и зависимостью τ от концентрации железа в образцах, приведенными в работе [1]. Однако следует отметить, что авторы [1] указывают на результат, полученный ими по $\tau \sim 150$ пс, как на предельный, так как полагают, что предельная растворимость железа в InP $4 \cdot 10^{16}$ см $^{-3}$. Известно, что в литературе приводятся более высокие значения предельной растворимости $\sim 2.5 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$ [10]. Исходя из этих значений, можно ожидать величину $\tau \sim 15$ пс. Полученные нами результаты близки к этим значениям; на образцах типа A концентрация железа, по нашим оценкам, $\sim 2 \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, а $\tau \sim 20$ пс.

Таким образом, полученные результаты близки к предельным, и можно ожидать для InP : Fe минимальных значений времен релаксации ~ 15 пс.

Список литературы

- [1] Foyt A. G., Leonberger F. J. // *Picosecond Optoelectronic Devices* / Ed. by C. H. Lee. Orlando, 1984. P. 271—311.
- [2] Orlando D. H., Johnson A. M., Smith P. R., Bean J. C. // *Appl. Phys. Lett.* 1980. V. 37. N 4. P. 371—374.
- [3] Smith P. R., Auston D. H., Johnson A. M., Augustyniak W. M. // *Appl. Phys. Lett.* 1981. V. 38. N 1. P. 47—50.
- [4] Адомайтис Э., Добровольскис З., Гореленок А. Т. и др. // *ФТП.* 1987. Т. 21. В. 1. С. 70—74.
- [5] Shanidi G. G., Ippen E. P., Melngailis J. // *Appl. Phys. Lett.* 1985. V. 46. N 8. P. 719—721.
- [6] Li K. K., Whinnery J. P., Dienes A. // *Picosecond Optoelectronic Devices* / Ed. by C. H. Lee. Orlando, 1984. P. 189—217.
- [7] Downey P. M., Auston D. H., Smith P. R. // *Appl. Phys. Lett.* 1983. V. 42. N 3. P. 215—217.
- [8] Fork R. L., Green B. I., Shank C. V. // *Appl. Phys. Lett.* 1981. V. 38. P. 197.
- [9] Valdmanis J. A. // *Thes. submitted for the Degree of Doctor of Philosophy.* N. Y., 1983.
- [10] Henry R. L., Swiggard E. M. // *J. Electron. Mater.* 1978. V. 7. N 5. P. 647—657.