

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
А В Т О М Е Т Р И Я

№ 3

1993

УДК 621.315.592.2 : 621.383.5 : 621.38.049.774

В. Ф. Андриевский, П. П. Асламов, Т. О. Бudyко, Е. В. Гущинская,
Э. В. Запорожец, С. А. Малышев, М. П. Рыжков, В. С. Шевцов

(Минск, Беларусь)

ФОТОПРИЕМНИКИ НА СОЕДИНЕНИЯХ $A^{III}B^V$
ДЛЯ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ С ОПТИЧЕСКИМИ СВЯЗЯМИ

Предложено использовать фотоприемники на соединениях $A^{III}B^V$ в трехмерных оптоэлектронных устройствах и интегральных схемах с оптическими связями. Исследованы фотоэлектрические характеристики МПМ-фотоприемников на арсениде галлия и фотодиодов на фосфиде индия.

Использование оптического излучения как носителя информационного сигнала позволяет проводить параллельную обработку информации, что открывает широкую перспективу в построении нового класса оптоэлектронных вычислительных машин. Принципы функционирования оптических процессоров, основанные на переносе оптической информации в вертикальной плоскости и фотоэлектрическом преобразовании информационного сигнала в горизонтальной плоскости, рассмотрены в [1—3]. Фотоприемники, функционирующие в составе оптоэлектронных вычислительных машин, должны отвечать ряду требований, позволяющих обеспечивать высокую квантовую эффективность, быстродействие, возможность интеграции с усилительными элементами. Спектральный диапазон чувствительности фотоприемника должен быть согласован с диапазоном волн, наиболее характерным для излучения полупроводниковых светодиодов и лазеров (0,6—1,55 мкм).

Материалами, пригодными для создания фотоприемных и излучающих элементов для работы в составе трехмерных интегральных схем с оптическими связями, являются соединения $A^{III}B^V$, и в частности арсенид галлия и фосфид индия. Преимущество материалов данного класса заключается в высоком квантовом выходе излучательной рекомбинации и внутреннего фотоэффекта (100%), малой диффузионной длине неосновных носителей заряда и размеров областей поглощения и генерации излучения (10^{-4} см); приборы на этих соединениях имеют высокое быстродействие (10^{-10} — 10^{-8} с). Все это позволяет увеличить по сравнению с кремнием плотность упаковки элементов в интегральных схемах, получить высокие скорости передачи и обработки информации. Указанные особенности дают возможность организовывать прямые оптические связи между элементами интегральных схем, созданных на основе данного класса материалов. Следует отметить также, что достигнутый уровень технологии на арсениде галлия и фосфиде индия позволяет создавать быстродействующие микро- и оптоэлектронные приборы и интегральные схемы [4—7].

Целью данной работы является исследование фотоприемников на основе арсенида галлия и фосфида индия, перспективных для работы в структуре трехмерных интегральных микросхем с оптическими связями. Среди известных вариантов арсенид-галлиевых фотоприемников наиболее интересными являются МПМ-фотоприемники [6] с точки зрения получения предельно высоких быстродействия и чувствительности и по технологической сов-

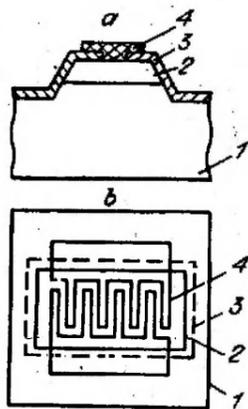


Рис. 1. Сечение (а) и топология (б) МПМ-фотоприемника на арсениде галлия:

1 — подложка GaAs:Cr, 2 — эпитаксиальный слой, 3 — пассивирующий диэлектрик, 4 — барьерные контакты

местимости с основным элементом арсенид-галлиевых интегральных схем — полевым транзистором [7]. Совместимость технологии таких фотоприемников и полевых транзисторов с барьером Шоттки позволяет производить их интеграцию в одном чипе для получения фоточувствительных интегральных схем. По сравнению с $p-n$ -переходом емкость МПМ-фотоприемников при равной рабочей площади гораздо меньше, что позволяет достигать более высокого быстродействия.

Структура исследуемого МПМ-фотоприемника представляет собой два гребенчатых контакта на поверхности слоя арсенида галлия с концентрацией носителей заряда 10^{14} см^{-3} (рис. 1). Активный эпитаксиальный слой толщиной 2 мкм выращен на полупроводниковой подложке арсенида галлия. Встречно-штыревые электроды располагаются на расстоянии 5 мкм друг от друга. Площадь фоточувствительной поверхности равна величине $1,2 \times 10^{-5} \text{ см}^2$. Поверхность арсенида галлия перед нанесением барьерного контакта обрабатывается в травителе составом $\text{HF} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 10$. Барьерные контакты формируются последовательным напылением титана и золота толщиной 50 и 100 нм соответственно.

На рис. 2, а приведены спектральные характеристики МПМ-фотоприемников. Как видно из полученных зависимостей, максимальная спектральная чувствительность приходится на край поглощения арсенида галлия ($\lambda_1 = 0,87 \text{ мкм}$), где наблюдается резкий пик. Второй максимум проявляется на $\lambda_2 = 1,2 - 1,3 \text{ мкм}$, что связано с влиянием глубоких центров, образованных примесью хрома. Резкий спад чувствительности на спектральном участке $\lambda < \lambda_1$ связан с высокой скоростью рекомбинации на поверхности арсенида галлия.

Абсолютная спектральная чувствительность фотоприемников в максимуме спектральной полосы при рабочих напряжениях 10—20 В составила 2—4 А/Вт при частоте 100 МГц, а квантовый выход фотоэффекта на краю полосы поглощения — 74%. Измеренные зависимости отношения сигнал/шум от напряжения смещения фотоприемников (рис. 2, б) позволяют оптимизировать рабочие напряжения МПМ-диодов при работе их в составе логических элементов устройств обработки оптической информации. Быстродействие фотоприемника на длине волны 1,3 мкм ограничивается временем перезарядки глубоких центров и значительно меньше, чем в области основной полосы поглощения ($\lambda = 0,87 \text{ мкм}$). Наличие двух спектраль-

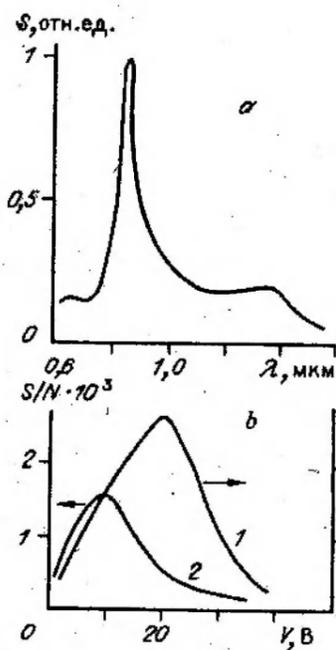
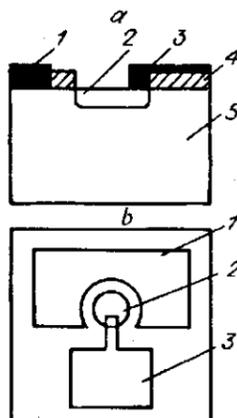


Рис. 2. Спектральная характеристика МПМ-фотоприемника (а) и зависимость отношения сигнал/шум от напряжения смещения (б) для двух образцов МПМ-диодов (1, 2)

Рис. 3. Сечение (а) и топология (b) фотодиода на фосфиде индия:

1 — контакт к *n*-области, 2 — область *p*-типа, 3 — контакт к *p*-области, 4 — пассивирующий диэлектрик, 5 — подложка фосфида индия



ных областей фоточувствительности с различными характеристическими временами дает дополнительную возможность управления информационным потоком при использовании двух длин волн.

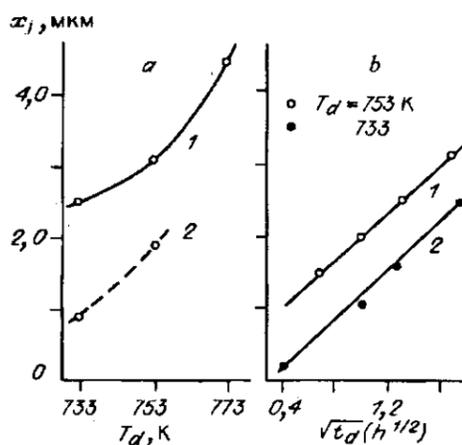
Реализовать описанную выше конструкцию МПМ-фотоприемника на фосфиде индия достаточно сложно, поскольку создание барьера Шоттки на этом материале связано с определенными трудностями. В данной работе приведены результаты исследования фотодиодов на фосфиде индия. Структура фотодиода (рис. 3) представляла собой планарный *p-n*-переход, сформированный в подложке *n*-типа, легированной теллуром с концентрацией 10^{16} см⁻³. Область *p*-типа диаметром 110 мкм создавалась локальной диффузией цинка. В качестве пассивирующего диэлектрического слоя использовалась двуокись кремния, которая наносилась методом пиролитического разложения тетраэтоксисилана. Перед нанесением двуокиси кремния подложки фосфида индия обрабатывались в смеси азотной и соляной кислот с последующей промывкой в деионизованной воде. Сформированный слой двуокиси кремния толщиной 0,25 мкм обеспечивал надежное маскирование поверхности фосфида индия в процессе диффузии.

Диффузия цинка выполнялась в открытой (проточной) газовой системе [8, 9]. В кварцевом реакторе помещалась подложка фосфида индия *n*-типа и пропускался водород, содержащий пары цинка. Диффузионный слой *p*-типа формировался на глубину 0,8—1,0 мкм.

Зависимость глубины залегания *p-n*-перехода от температуры представлена на рис. 4, а. Процесс диффузии цинка в фосфид индия происходил в равновесных условиях, и коэффициент диффузии не зависел от времени, что доказывает линейная зависимость функции $x_j = f(\sqrt{t})$, где x_j — глубина залегания *p-n*-перехода, t — время проведения диффузии (рис. 4, б). Для этих образцов было определено распределение концентрации свободных носителей заряда по глубине диффузионного слоя при разных температурах и временах диффузии (рис. 5). Поверхностная концентрация носителей заряда на фосфиде индия после диффузии цинка составляла $(1 - 2) \cdot 10^{18}$ см⁻³.

Омический контакт к *p*-области формировался термическим распылением сплава AuZn (Zn 20%) и золота (50, 100 нм) с последующим вжиганием в среде водорода при 450 °С. Удельное сопротивление таких контактов $R_c = (1 - 3) \cdot 10^{-5}$ Ом · см². Контакт к *n* — InP-подложке создавался нанесением последовательно слоев сплава AuGe (Au 88%), нике-

Рис. 4. Зависимость глубины залегания *p-n*-перехода от температуры диффузии (время диффузии: 1 — 3, 2 — 1 ч) (а) и корня квадратного из времени диффузии (температура диффузии: 1 — 753, 2 — 733 К) (б)



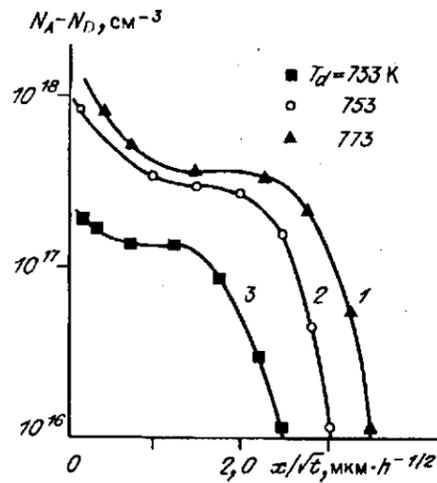


Рис. 5. Распределение концентрации свободных носителей заряда по глубине p -слоя при разных температурах диффузии (К): 1 — 773, 2 — 753, 3 — 733

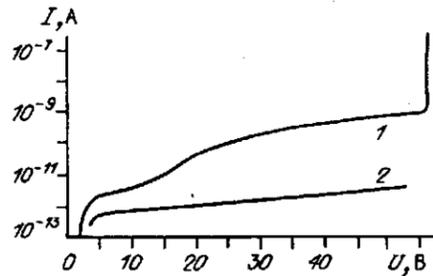
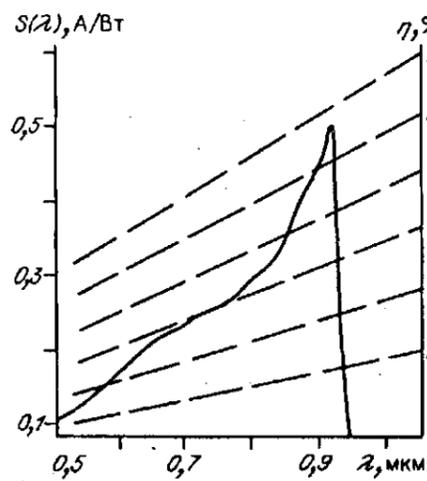


Рис. 6. Вольт-амперная характеристика фотодиода на фосфиде индия: 1 — исследуемый фотодиод, 2 — расчетная зависимость генерационного тока

ля и золота (50, 10, 100 нм) и вжиганием при той же температуре. Удельное сопротивление получаемых контактов $R_c = (3 - 5) \times 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

Теоретическая и экспериментальная вольт-амперные характеристики фотодиода на фосфиде индия при обратном смещении представлены на рис. 6. Темновой ток при напряжении смещения 10 В составил $3 \cdot 10^{-12} \text{ А}$, а напряжение пробоя — 57 В. Минимальный темновой ток фотодиодов на фосфиде индия определяется генерацией неосновных носителей заряда в области пространственного заряда. Вероятные механизмы, приводящие к появлению избыточного тока при обратном смещении, могут быть связаны с утечками на границе раздела диэлектрик — полупроводник либо с утечками, обусловленными структурными дефектами в области объемного заряда.

Спектральная характеристика фотодиодов на фосфиде индия приведена на рис. 7. Абсолютное значение токовой спектральной чувствительности на длине волны 0,92 мкм без антиотражающего покрытия имело значение 0,5 А/Вт при смещении 10 В, что соответствует квантовому выходу фотоэффекта 67 %. Исследование неоднородности характеристики $p - n$ -перехода показало, что разброс темнового тока $p - n$ -перехода по подложке для 10 элементов составил величину, не превышающую 15 %.



Рассмотренные фотоприемники могут быть использованы для работы в составе логических оптоэлектронных элементов. Достигнутые фотоэлектрические параметры, простота конструкции позволяют создавать не только дискретные, но также и матричные фотоприемные элементы для организации трехмерных оптоэлектронных устройств и интегральных микросхем с оптическими связями.

Рис. 7. Спектральная характеристика фотодиода на фосфиде индия

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Косцов Э. Г., Мишин А. И. Особенности построения оптических цифровых вычислительных машин // Микроэлектроника.—1977.—№ 2.
2. Егоров В. М., Косцов Э. Г. Перспективы создания оптических цифровых высокопроизводительных вычислительных устройств // Автометрия.—1985.—№ 1.
3. Armand R., Tanguay Jr. Materials requirements for optical processing and computing devices // Opt. Eng.—1985.—24, N 1.—P. 3.
4. Полевые транзисторы на арсениде галлия /Пер. с англ. под ред. Д. В. Ди Лоренцо, Д. Д. Конделуола.—М.: Радио и связь, 1988.
5. Albrecht H. InGaAs pin photodiodes and JFET on InP: Fe substrates for optoelectronic IC's // Proc. SPIE.—1985.—587.—P. 131.
6. Van Zeghbroeck B. I., Patric W., Halbout M., Vettiger P. 105-GHz bandwidth metal-semiconductor metal photodiode // IEEE Electron Dev. Lett.—1988.—9, N 10.—P. 527.
7. Slayman C. W., Figuezoa L. Frequency and pulse response of a novel high speed interdigital surface photoconductor // Ibid.—1981.—EDL-2, N 5.—P. 112.
8. Зайцев И. И., Осинский В. И., Привалов В. И. и др. Диффузия цинка в соединениях $A^{III}B^V$ в проточной системе без пассивации поверхности при создании $p-n$ -переходов // Электрон. техника. Сер. 7.—1983.—Вып. 3.
9. Budko T. O., Guchchinskaya E. V., Emelyanenko Ju. S. and Malyshev S. A. Diffusion of zinc into an unpassivated surface of indium phosphide // Phys. Stat. Sol. (a).—1989.—N 111.—P. 451.

Поступила в редакцию 16 марта 1993 г.