

## ФОТОДИОДНЫЕ МПМ СТРУКТУРЫ С НИЗКОЙ ВЕЛИЧИНОЙ ПЛОТНОСТИ ТЕМНОВОГО ТОКА

С. В. Аверин, С. В. Новиков,<sup>1</sup> А. Мескида-Кюстерс,<sup>2</sup>  
В. Т. Потапов, К. Хейме,<sup>2</sup> А. Н. Царев, Ю. В. Шмарцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Институт радиотехники и электроники, 141120, Фрязино, Россия  
<sup>1</sup> Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе Российской академии наук,  
 194021, Санкт-Петербург, Россия  
<sup>2</sup> Институт полупроводниковой электроники, Аахен, Германия  
 (Получена 30 апреля 1993 г. Принята к печати 30 апреля 1993 г.)

Использование эпитаксиальных слоев GaAs:Bi, легированных изovalентными примесями, приводит к существенно лучшим электрическим характеристикам изготовленных на их основе быстродействующих фотодиодных структур типа МПМ, в частности, к меньшим величинам плотности темнового тока показателя «идеальности» ВАХ и большей величине напряжения лавинного пробоя. Применение таких структур в различных оптоэлектронных устройствах обеспечит их лучшие шумовые характеристики.

В последние годы быстродействующие встречно-гребенчатые МПМ (металл—полупроводник—металл) фотодиодные структуры на основе GaAs были исследованы и с успехом применены при создании быстродействующих фотоприемных устройств [1–4]. Интерес исследователей к МПМ фотодиодам объясняется возможностью создания на их основе сверхбыстродействующих монолитных оптоэлектронных схем, в которых МПМ фотодетектор совместно с последующей схемой обработки электрических сигналов изготавливается на одном полупроводниковом кристалле и, что не менее важно, в одном технологическом процессе. В результате фотоприемники, основанные на МПМ фотодетекторах, монолитно интегрированных с усилителем на транзисторах типа FET, оказываются более предпочтительными по сравнению с обычными приборами типа PIN-FET, так как их изготовление много проще, а, следовательно, стоимость меньше.

Применение таких устройств для целей телекоммуникации и оптических систем обработки информации в недалеком будущем весьма актуально, особенно если учесть, что усилители на FET уже созданы и исследованы по крайней мере вплоть до частот  $\approx 60$  ГГц [5].

По существу фотодиодная структура типа МПМ состоит из двух барьеров Шоттки, включенных навстречу друг другу, обратный ток одного из них определяет шумовые характеристики и, следовательно, чувствительность детектора. При этом, поскольку МПМ диод является поверхностно-барьерным фотодетектором, качество полупроводникового материала в области непосредственно под контактом чрезвычайно важно с точки зрения достижения низких значений величин плотностей темнового тока барьера и, следовательно, чувствительности фотодетектора. Наличие различного рода дефектов глубоких «ловушек» и дислокаций в эпитаксиальном GaAs обычно приводит к большим величинам плотностей темновых токов МПМ фотодиодов. Эти значения далеки от оптимальных, которые необходимы для достижения низких значений минимального детектируемого уровня мощности оптического излучения [1–4].

В работе [6] проблема уменьшения плотности темнового тока в МПМ структуре на основе GaAs решалась путем использования в качестве контакта Шоттки силицида вольфрама. Однако последовательное сопротивление такого контакта достаточно велико, что в результате приводит к неудовлетворительным характеристикам быстродействия фотодетектора ( $\approx 1.3$  ГГц).

В связи с этим необходим поиск других путей улучшения шумовых характеристик МПМ фотодиодов на основе GaAs, связанных прежде всего с очисткой GaAs от примеси. Известно, что основной фоновой примесью в GaAs является Si. Поэтому эффективная очистка GaAs может быть осуществлена с помощью изовалентных примесей, которые активно взаимодействуют с Si [7]. Такой примесью для GaAs является Bi. В работе [7] был предложен механизм очистки слоев GaAs, основанный на том, что энергия взаимодействия основной фоновой примеси Si с Ga и Bi в жидкой фазе различны. В дальнейшем было обнаружено, что эффект очистки имеет место и в эпитаксиальных слоях, не загрязненных кремнием [8].

Сформулируем основные задачи нашего исследования.

1. Исследование возможности создания на полуизолирующих подложках эпитаксиальных структур GaAs с низкой плотностью дислокаций и низкой концентрацией остаточных примесей.

2. Исследование возможностей уменьшения темновых токов барьера Шоттки в МПМ структурах с целью увеличения чувствительности фотодетектора.

Технология изготовления структур состояла в следующем. Слои арсенида галлия выращивались методом жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ) на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией (100) при пониженных температурах роста. В качестве растворителя при формировании раствора-расплава использовался чистый висмут. Температура начала эпитаксии  $800^\circ\text{C}$ , интервал охлаждения  $50^\circ\text{C}$ , скорость охлаждения порядка  $0.5$  град/мин. Для обеспечения заданной величины потока водорода через реактор (порядка  $5$  л/ч) в процессе ЖФЭ использовались электронные регуляторы расхода газа. Использование растворов-расплавов, содержащих висмут, при ЖФЭ слоев арсенида галлия приводит к существенному уменьшению концентрации остаточных примесей. Наличие висмута обуславливает изменение соотношения концентраций галлия и мышьяка в жидкой фазе, вызывая перераспределение вакансий по анионной и катионной подрешеткам и соответствующие изменения концентраций примесей, встраивающихся в эти подрешетки. Этот процесс приводит к «очистке» слоев GaAs от наиболее характерных фоновых примесей [8]. В ходе проведения данных исследований были изготовлены эпитаксиальные слои GaAs : Bi с параметрами: толщина

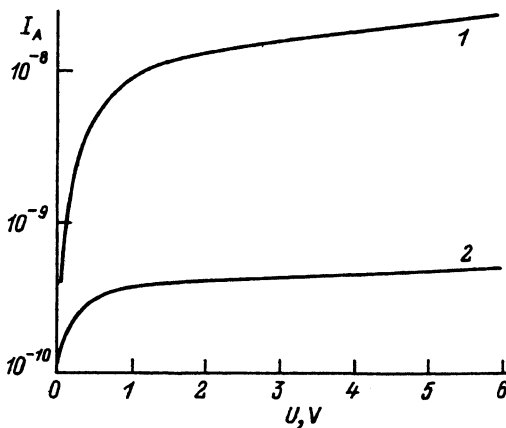


Рис. 1. Темновые ВАХ для обычных (1) и GaAs : Bi (2) фотодиодных структур типа МПМ.

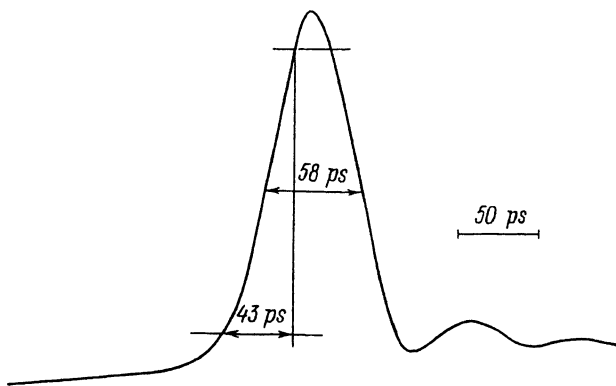


Рис. 2. Форма импульсного сигнала МПМ фотодиода гребенчатого типа на основе GaAs : Vi.

эпитаксиального слоя 5 мкм, минимальная концентрация носителей заряда  $N_D = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , максимальная подвижность  $\mu = 7.7 \cdot 10^3 \text{ см}^2 \text{ В/с}$ .

Методами контактной фотолитографии на поверхности эпитаксиального GaAs : Vi создавалась гребенчатая система электродов—барьеров Шоттки с параметрами: апертура 100 мкм, ширина контактного электрода и расстояние между электродами 5 мкм, число пар контактных электродов 5. Толщина слоя металла составляла 0.3 мкм (металл барьера Ti—Pt—Au). Мы также изготовили обычные МПМ фотодиоды [9] на эпитаксиальном GaAs, выращенном на полуизолирующих подложках, но без изовалентного легирования эпитаксиального слоя висмута. В обоих случаях эпитаксиальные слои имели примерно одинаковые толщины и концентрации свободных носителей зарядов. Таким образом, сравнение электрических характеристик обоих типов МПМ диодов приводит к прямому наблюдению влияния эффекта изовалентного легирования на их характеристики. ВАХ изготовленных GaAs : Vi фотодиодных структур типа МПМ были симметричны относительно начала координат при приложении напряжения смещения обеих полярностей, темновой ток составлял  $5 \cdot 10^{-10} \text{ А}$  при напряжении смещения  $\pm 6 \text{ В}$  (рис. 1). Эта величина приводит к плотности темнового тока контакта, равной  $10^{-5} \text{ А/см}^2$ , что намного меньше, чем у МПМ фотодиодов, изготовленных на

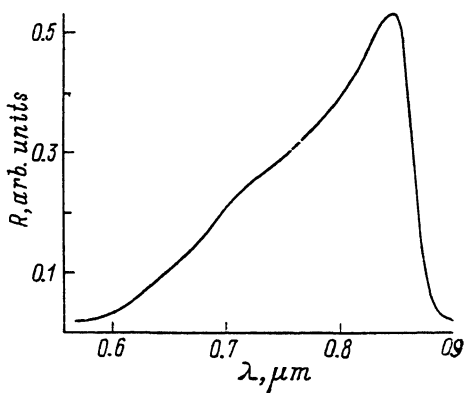


Рис. 3. Зависимость фоточувствительности от длины волны принимаемого излучения для фотодиодной структуры типа МПМ на основе GaAs : Vi.

обычным GaAs ( $5 \cdot 10^{-4}$  А/см<sup>2</sup>). Резкий лавинный пробой в МПМ структурах, изготовленных на основе GaAs : Bi, наблюдался лишь при напряжениях смещения ~30 В в сравнении с «мягким» пробоем при  $U = 20$  В для обычных GaAs МПМ структур, что свидетельствует о низкой плотности дислокаций в приповерхностном слое полупроводниковых структур GaAs : Bi. Показатель качества (коэффициент идеальности) был изменен по методике, описанной в работе [10], и составил 1.05 для GaAs : Bi диодных МПМ структур и 1.1 для обычных МПМ диодов, свидетельствуя о высоком качестве барьеров Шоттки в изготовленных диодных структурах.

Быстродействие исследуемых фотодиодных структур определялось путем измерения времени нарастания и спада импульсного сигнала на МПМ фотодетекторе, который возбуждался инжекционным гетеролазером в системе GaAlAs ( $\lambda = 0.85$  мкм), работающем в режиме самоподдерживающихся пульсаций со временем нарастания импульса ~20 пс [11]. Сигнал с фотодиода, смонтированного в микрополосковой линии, регистрировался на стробоскопическом осциллографе HP-1430-C с временным разрешением ~20 пс. На рис. 2 представлена типичная осциллограмма фотоотклика, полученного с МПМ фотодиода на GaAs : Bi. Как видно из рисунка, время нарастания импульса (по уровню 10%—90%) составляет 43 пс. Поскольку при таких коротких временах сигнала отклика с фотодиодов характеристики быстродействия осциллографа и лазера заметно влияют на результаты измерений быстродействия фотодетекторов, мы не обнаружили заметной разницы во временах нарастания импульсного сигнала с МПМ фотодетектора, изготовленного на GaAs : Bi, и обычного МПМ диода [9]. Однако форма спада импульсного сигнала в случае МПМ диода на GaAs : Bi заметно меньше искажена, что может быть связано с использованием более чистого полупроводникового материала.

Измерение спектральной fotocувствительности исследуемых МПМ диодов (рис. 3) было проведено на монохроматоре МДР-23 с использованием калиброванного фотометра 550 фирмы EGG. Как и ожидалось, измеренная длина волны отсечки ( $\lambda \sim 0.86$  мкм) ограничена величиной энергетической щели GaAs. Экспериментально определенная величина fotocувствительности на длине волны 0.85 мкм составила 0.35 А/Вт, что является вполне допустимым, особенно если учесть, что 50% площади активной области фотодетектора экранировано от принимаемого излучения электродной системой барьерных контактов Шоттки.

Таким образом, в работе показано, что использование изовалентно-легированных эпитаксиальных слоев GaAs приводит к существенно лучшим электрическим характеристикам изготовленных на их основе фотодиодных структур МПМ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] C. S. Harder, B. van Zeghbroeck, W. Patrick, P. Vettiger, IEEE Electron Device Letters, 9, 171 (1988).
- [2] J. E. Vinchant, J. P. Vilcot, J. L. Lorrtaux, D. Decoster. Appl. Phys. Lett., 55, 1966 (1989).
- [3] M. Ito et al. Appl. Phys. Lett., 47, 1129 (1985).
- [4] R. J. Dert et al. IEEE Photonics Technol. Lett., 2, 581 (1990).
- [5] G. M. Metz. IEEE Electr. Dev. Lett., 9, 165 (1989).
- [6] M. Ito, O. Wada. IEEE J. Quant. Electron., GE-22, 1073 (1986).
- [7] Н. В. Ганина, В. Б. Уфимцев, В. И. Фистуль. Письма ЖТФ, 8, 620 (1982).
- [8] Ю. Ф. Бирюлин, В. В. Воробьева, В. Г. Голубев, Л. В. Голубев, В. И. Иванов-Омский, С. В. Новиков, А. В. Осутин, И. Г. Савельев, В. В. Чалдышев, Ю. В. Шмарцев, О. В. Ярошевич. ФТП, 21, 2201 (1987).
- [9] С. В. Аверин, М. Д. Дмитриев, А. Н. Царев, Б. Б. Еленкриг. Письма ЖТФ, 14, 2215 (1988).
- [10] С. В. Аверин. Микроэлектроника, 21, 42 (1992).
- [11] Ж. И. Алфёров, А. Б. Журавлев, Е. Л. Портной, Н. М. Стельмах. Письма ЖТФ, 12, 1093 (1986).