

Фотоэлектроника

УДК 535.231.6

Неохлаждаемые матричные микроболометрические приемники ИК-излучения на основе золь-гель VO_x

В. Н. Овсяк, В. В. Шашкин, М. А. Демьяненко, Б. И. Фомин,
Л. Л. Васильева, А. П. Соловьев

Институт физики полупроводников СО РАН, г. Новосибирск, Россия

Разработана технология изготовления высококачественных неохлаждаемых матричных микроболометрических приемников, в основе которой лежит простая и дешевая золь-гель-технология получения термочувствительных слоев VO_x . Созданы матричные микроболометрические приемники форматом 160×120 и 320×240 , обладающие спектральным диапазоном чувствительности 8–14 мкм. Достигнута разность температур, эквивалентная шуму, менее чем 80 мК, при частоте кадров 60 Гц для формата 160×120 и использовании оптики с относительным отверстием 1/1.

Расширение сферы применения тепловизионных и других ИК-приборов требует, наряду с повышением их чувствительности, понижения стоимости, энергопотребления, массы, высокой надежности и простоты использования. Всем этим требованиям удовлетворяют активно разрабатываемые последние два десятилетия неохлаждаемые матричные приемники [1–3], для создания которых широко используются три эффекта: пироэлектрический, терморезистивный и термоэлектрический. В некоторых разработках используются эффект термоупругой деформации, например приводящий к изгибу микроантенилера [4], а также прямое превращение теплового сигнала в оптический образ, доступный человеческому глазу, минуя стадию электрической обработки [5].

Наибольшее распространение получили болометрические приемники, основанные на терморезистивном эффекте, достигшие формата 320×240 и минимальной разрешаемой температуры менее 30 мК [6], что близко к параметрам криогенных фотонных матричных приемников. В качестве терморезистивного материала преимущественно используются оксиды ванадия [7] и аморфный кремний [8]. В последнем случае весь процесс изготовления микроболометров полностью проводится в рамках обычной кремниевой технологии.

Высокие параметры неохлаждаемых матричных микроболометрических приемников (ММБП) достигнуты в первую очередь благодаря разработкам технологий получения термочувствительных слоев и изготовления микромостиковых структур. Поскольку матричные микроболометрические приемники изготавливаются в интегральном исполнении, то основным требованием к указанным технологиям является их совместимость с технологией изготовления

кремниевых мультиплексоров. Традиционные методы получения термочувствительных слоев оксидов ванадия VO_x — реактивные магнетронное и ионно-лучевое распыления — достаточно сложны и требуют дорогостоящего оборудования. Для получения термочувствительных слоев аморфного кремния используется технология плазмохимического газофазного осаждения из моносилана с добавлением фосфина, что создает дополнительные трудности.

В настоящей работе поставлена задача — разработать технологию изготовления высококачественных матричных микроболометрических приемников, в основе которой лежит простая и дешевая технология, позволяющая получать термочувствительные слои VO_x с необходимыми характеристиками и совместимая с кремниевой технологией. Учитывая, что интегральное исполнение и использование полиимида в качестве жертвенного слоя ограничивают температурный бюджет разрабатываемой технологии, в качестве базовой выбрана золь-гель-технология [9], в основе которой лежат процессы гидролиза и конденсации алкоксидов металлов при комнатной температуре. К достоинствам этой технологии следует также отнести высокую чистоту исходных реагентов (алкоксидов) и минимальные трудности при увеличении размеров подложек.

Золь-гель-технология получения слоев оксидов ванадия

Требования к электрофизическим свойствам термочувствительного слоя на основе VO_x могут быть сформулированы следующим образом:
температурный коэффициент сопротивления (ТКС) $\alpha \sim 2\% \text{ K}^{-1}$;

поверхностное сопротивление $R_s \sim 100$ кОм; неоднородность по пластине по ТКС и R_s — не более 5 %; параметр, характеризующий величину $1/f$ шума болометра $Q = f_0/I_b^2 R_b \leq 3 \cdot 10^6$ Дж⁻¹.

При выполнении последнего требования вклад $1/f$ шума в мощность, эквивалентную шуму, будет меньше вклада тепловых флуктуаций для микроболометра с типичными параметрами ($\alpha = 2$ %/К, теплопроводность $G = 10^{-7}$ Вт/К, время тепловой релаксации $\tau = 10^{-2}$ с).

Здесь f_0 — частота, на которой спектральная мощность $1/f$ шума сравнивается со спектральной мощностью белого шума Джонсона; I_b и R_b — ток смещения и сопротивление болометра, соответственно.

Для получения слоев оксидов ванадия разного состава с применением золь-гель-технологии сначала получают слои высшего оксида ванадия V_2O_5 , используя при этом раствор изопропоксида ванадила $VO-(OC_3H_7)_3$, содержащего пятивалентный ванадий. В качестве растворителя использовался изопропиловый спирт. Чтобы получать слои с меньшим содержанием кислорода, в том числе и VO_x с $x \approx 2$, после отжига на воздухе, завершающего процесс получения V_2O_5 , слои отжигаются в восстановительных средах.

Выбор оптимальной концентрации раствора определялся последующей операцией нанесения слоев методом центрифугирования с требуемой

толщиной слоев ~ 1000 Å. В ходе центрифугирования происходит частичное испарение растворителя, а также идет гидролиз изопропоксида, т. е. происходит замена спиртовых групп $-(OC_3H_7)_3$ на ОН-группы за счет присутствующей в атмосфере влаги. Начинается также процесс поликонденсации с образованием оксополимеров типа $[VO(OC_3H_7)_{3-x}(OH)_x]_n$ и т. п.

При высушивании слоев на воздухе происходит дальнейшее испарение растворителя, продолжаются процессы гидролиза и поликонденсации, приводящие к образованию V—O—V-связей с выделением молекул H_2O . Дальнейший отжиг проводится для удаления следов органики, воды и уплотнения образующихся слоев.

Восстановление пленок V_2O_5 до состава VO_x с $x \approx 2$ проводится путем отжигов в восстановительных средах ($Ar + H_2$) при температурах, не превышающих 350 °С.

Электрофизические свойства слоев оксидов ванадия

Для конструирования матричных микроболометрических приемников важно знать зависимость величины ТКС от сопротивления используемых в технологии оксидов ванадия.

На рис. 1 показана зависимость ТКС слоев оксидов ванадия, полученных золь-гель-методом, от их удельного сопротивления ρ , меняющегося

в большом диапазоне в зависимости от степени восстановления. ТКС является монотонной функцией сопротивления, причем значение $\alpha = 2$ %/К наблюдается при $\rho = 1$ Ом·см, что при

толщине слоя, равной 1000 Å, соответствует $R_s = 100$ кОм и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к слою. Неоднородность слоевого сопротивления оксидов ванадия по пластине диаметром 76 мм не превышает 5 %, что приемлемо для создания ММБП.

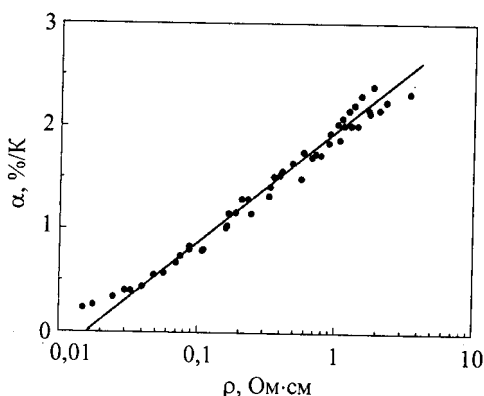


Рис. 1. Зависимость температурного коэффициента сопротивления оксидов ванадия, полученных золь-гель-методом, от их удельного сопротивления

Другим важным параметром является величина токового шума, имеющего спектральную зависимость типа $1/f$. На рис. 2 приведены спектральные зависимости шумового напряжения V_n для нескольких значений величины тока, протекающего через тестовый микроболометр с сопротивлением $R_b = 48$ кОм. Толщина и площадь

островка оксида ванадия составляли 1100 Å и $1,5 \cdot 10^{-5}$ см², соответственно. Напряжение $1/f$ шума измерялось как разность значений, измеренных при протекании тока через образец и без тока. Горизонтальная (пунктирная) линия (см. рис. 2) соответствует шуму Джонсона. Параметр Q , характеризующий шум, равен $4,3 \cdot 10^6$ Дж⁻¹, что близко к требуемому значению $3 \cdot 10^6$ Дж⁻¹.

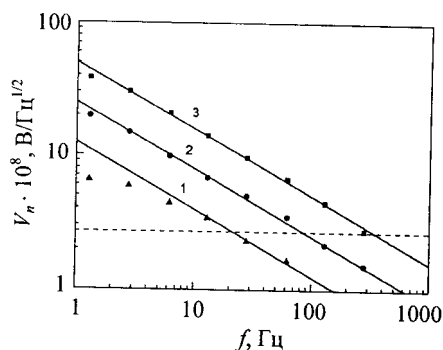


Рис. 2. Зависимости шумового напряжения V_n от частоты f для трех значений тока, протекающего через тестовый болометр: 1 — 10; 2 — 20; 3 — 40 мкА; — — — зависимости $1/f$; - - - - шум Джонсона

Технология изготовления ММБП

Технологический маршрут изготовления ММБП на кремниевых мультиплексорах состоит из следующих операций.

Слой алюминия. Нанесение производится на установке магнетронного распыления. Формируются контактные площадки, разводка, зеркала, знаки совмещения.

Жертвенный слой. Наносится полиимид, производится его предварительная сушка, формируются воронкообразные окна до алюминиевых контактных площадок, происходит имидизация полиимида.

Нижний слой нитрида кремния. Используется стандартный для микроэлектроники метод плазмохимического нанесения. Толщина пленки d_{SiN} в зависимости от задач варьируется в

диапазоне 1000–1500 Å. Проводится плазмохимическое травление окон в пленке нитрида кремния до алюминиевых контактных площадок. Спектр пропускания ИК-излучения слоями используемого нитрида кремния, нормированного на толщину слоя, равную 0,1 мкм, приведен на рис. 3. Измерялись коэффициенты пропускания T_{SiN} и отражения слоев нитрида кремния, осажденных на германиевую подложку, а также самой подложки T_{Ge} . Коэффициент отражения для обоих случаев составлял $\approx 0,4$ и слабо зависел от длины волны. Видно, что поглощения на связях Si–H, N–H и Si–O мало, а основное поглощение происходит в области 8–14 мкм и обусловлено Si–N-связями, что задает область спектральной чувствительности ММБП, приведенной на этом же рисунке.

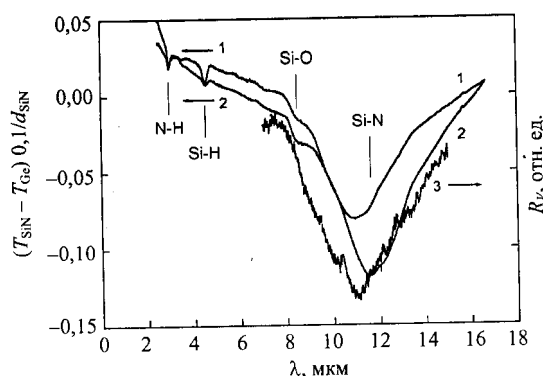


Рис. 3. Спектры пропускания двух различных слоев нитрида кремния (кривые 1, 2), нормированные на толщину слоя, равную 0,1 мкм, и спектральная зависимость чувствительности болометров R_{γ} (кривая 3), изготовленных на слоях нитрида кремния, соответствующих кривой 1

Пленка титана. Магнетронным распылением формируются титановые шины, идущие по нитридной балке, и контакты к оксиду ванадия.

Толщина пленки — 500 Å.

Оксид ванадия. Для получения слоев оксида ванадия использовалась золь-гель-технология, описанная выше.

Верхний слой нитрида кремния. Используется стандартный для микроэлектроники метод плазмохимического нанесения. Толщина слоя 1000–1500 Å. Формируется нитридный мостик путем плазмохимического травления.

Удаление жертвенного слоя. Полиимид удаляется в кислородной плазме.

Образцы неохлаждаемых матричных микроболометрических приемников

Были изготовлены ММБП форматом 160×120 и 320×240. В качестве схемы считывания использовались мультиплексоры, разработанные совместно ОАО "Ангстрем" и ОАО «ЦНИИ "Циклон"» (Москва). Считывание сигнала с элементов микроболометрической матрицы основано на использовании потенциальной мостовой схемы Уитстона, в одном из верхних плеч которой стоят чувствительные микроболометрические элементы, а в другом — аналогичные им, но закрытые от воздействия падающего ИК-излучения. Нижние плечи моста выполнены из "закороченных по температуре" микроболометров, т. е. выполненных без вакуумного зазора. Такая схема включения обеспечивает сохранение баланса моста даже при значительном разогреве чувствительных элементов матрицы в процессе считывания сигнала, который может достигать значений ≈ 15 К для микроболометров, имеющих ТКС $\alpha = 2\%$ /К. Кроме того, потенциальная мостовая схема в отличие от схемы с прямой подачей напряжения на болометр [10] менее чувствительна к шумам напряжения смещения и величине сопротивлений болометров.

На рис. 4 приведен снимок фрагмента одного из исследованных ММБП, сделанный с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM). Шаг матрицы 51×51 мкм. Суммарная

толщина нитрида кремния около 3000 Å, ширина нитридной несущей балки 1,6 мкм, полиимид толщиной около 2,5 мкм удален в кислородной плазме.

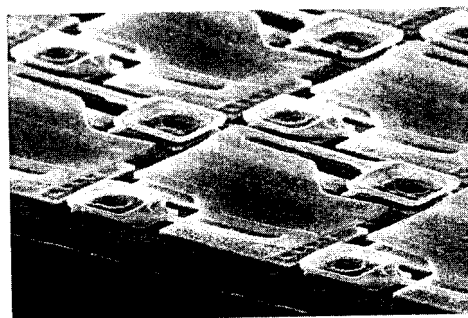


Рис. 4. Фрагмент ММБП форматом 160×120, сделанный с помощью сканирующей электронной микроскопии

Теплопроводность микроболометров измерялась на тестовых элементах, расположенных на краю кристалла ММП, и составляла $\approx 1,0 \cdot 10^{-7}$ Вт/К. Время тепловой релаксации составило ≈ 12 мс. Среднеквадратичное отклонение относительного сопротивления болометров по массиву матрицы составляло 3,5 %. Средняя величина сигнала ММБП V_S при изменении температуры абсолютно черного тела от 300 до 373 К (с относительным отверстием 1/1) и смещении моста 4,4 В составляла 350 мВ.

На рис. 5 приведен пример теплового изображения, полученного с помощью изготовленного ММБП форматом 160×120. Использованный германиевый объектив имел относительное отверстие, равное 1/1,4. Эквивалентная шуму разность температур NETD для относительного отверстия 1/1 составила 77 мК при напряжении смещения моста, равном 5,4 В, и частоте кадров 60 Гц.



Рис. 5. Тепловое изображение, полученное с использованием неохлаждаемого ММБП форматом 160×120

Заключение

Разработана технология изготовления высококачественных неохлаждаемых матричных микроболометрических приемников, в основе которой лежит простая и дешевая золь-гель-технология, совместимая с кремниевой технологией

и позволяющая получать термочувствительные слои VO_x с необходимыми характеристиками.

Созданы матричные микроболометрические приемники форматом 160×120 и 320×240, обладающие спектральным диапазоном чувствительности 8–14 мкм, получены качественные ИК-изображения. Достигнута разность температур, эквивалентная шуму, менее чем 80 мК при частоте кадров 60 Гц для формата 160×120 и использовании оптики с относительным отверстием 1/1.

Результаты выполненной разработки позволяют в ближайшее время создать неохлаждаемые фотоприемные устройства на основе матричных микроболометрических приемников форматом 160×120 и 320×240 для диапазона 8–14 мкм, состоящие из малогабаритного вакуумного корпуса, снабженного просветленным германиевым окном, геттером, термоэлектрическим охладителем и транзисторным датчиком температуры для стабилизации температуры болометрического приемника.

Литература

1. Роговский А. Инфракрасные детекторы. — Новосибирск: Наука, 2003.
2. Певцов Е., Чернокожин В.// Электронные компоненты. 2001. № 1–3.
3. Хребтов И. А., Маляров В. Г.// Оптический журнал. 1997. Т. 64. № 6. С. 3.
4. Amantea R., Goodman L. A., Pantuso F. P. et al.// Proc. SPIE. 1998. V. 3436. P. 647.
5. Norton P., Mao M., Perrazo T. et al.// Ibid. 2000. V. 4028. P. 72.
6. Филачев А. М., Пономаренко В. П., Таубкин И. И., Ушакова М. Б.// Прикладная физика. 2003. № 1. С. 105.
7. Murphy R., Kohin M., Backer B. et al.// Proc. SPIE. 2000. V. 4028. P. 12.
8. Mottin E., Martin J.-L., Ouvrier-Buffet J.-L. et al.// Ibid. 2000. V. 4028. P. 40.
9. Guzman G., Morineau R. and Livage J.// Materials Research Bulletin. 1994. V. 5. P. 509.
10. Parish W. J., Woolaway J. T., Kincaid G. et al.// Proc. SPIE. 1998. V. 3360. P. 111.

Статья поступила в редакцию 23 ноября 2004 г.

Uncooled microbolometer IR FPA based on sol-gel VO_x

V. N. Ovsyuk, V. V. Shashkin, M. A. Demyanenko, B. I. Fomin,
L. L. Vasilieva, A. P. Soloviev

Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, Russia

The technology of fabrication of high-quality uncooled focal plane arrays (FPA) has been developed. Simple and cheap sol-gel technology of preparation of thermosensitive vanadium oxide layers is underlain in its basis. Uncooled 160×120 and 320×240 FPA for 8–14 microns spectral range of sensitivity have been fabricated. The noise equivalent temperature difference less than 80 mK has been achieved at frame frequency 60 Hz for 160×120 FPA and at use of optics with 1/1 relative aperture.