

УДК 621.383.52:546.48'49'24

ФОТОДИОДЫ И ФОТОДИОДНЫЕ МАТРИЦЫ НА ОСНОВЕ $Cd_xHg_{1-x}Te$

Л. А. Бовина, В. И. Стафеев

Государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение "Орион"»,
Москва, Россия

Изложены результаты разработки и исследований основных характеристик одноэлементных фотодиодов из соединений ртуть — кадмий — теллур (КРТ), в том числе в гетеродинном режиме с быстродействием до 1 ГГц, на спектральные диапазоны 3–5 и 8–12 мкм. Изложены особенности топологии и технологии матричных фотоприемников форматов 32x32, 128x128, 384x288, 4x16, 4x48, 2x96, 4x128, 2x256 на спектральные диапазоны 3–5 и 8–12 мкм, изготовленных как на объемных монокристаллах, так и эпитаксиальных слоях, выращенных различными технологическими методами. Проанализированы проблемы временной и температурной стабильности фотодиодов из КРТ и возможные пути совершенствования параметров МФП.

Твердый раствор $Cd_xHg_{1-x}Te$ (КРТ) является основным полупроводниковым материалом современной ИК-техники. Изменением соотношения кадмия и ртути можно обеспечить получение оптимальной спектральной характеристики для требуемой области спектра. На основе этого материала возможно создание как фоторезисторов и спрайт-фотоприемников, так и фотодиодов, вплоть до сверхбыстродействующих. Интерес с КРТ особенно возрос после создания на его основе матричных фотоприемников.

В ГУП «НПО "Орион"» разработки фотодиодов были начаты в начале 70-х, а матричных фотоприемников в середине 80-х гг. Были разработаны одноэлементные фотодиоды [1], в том числе сверхбыстродействующие [2], квадрантные, линейчатые, матричные многорядные [3] и "смотрящего" типа [4] форматов 4x16, 4x48, 2x96, 4x128, 2x256, 32x32, 128x128 и 384x288. К настоящему времени созданы фотоприемники на спектральные диапазоны: 1,5–3, 3–5 и 8–12 мкм в конструкциях с термоэлектрическим охлаждением, с дроссельной системой охлаждения или системой охлаждения типа Сплит-Стирлинга. Они изготавливались как на объемных монокристаллах (Гиредмет), так и на эпитаксиальных слоях, выращиваемых различными технологическими методами: молекулярно-лучевой эпитаксией — МЛЭ (ИПФ СО РАН), жидкостной эпитаксией (Гиредмет) и методом испарение—конденсация—диффузия—ИКД (НИИПФ) [5–7].

Фотодиоды обычно изготавливались на объемных монокристаллах, однако сверхбыстродействующие создавались на эпитаксиальных слоях, выращенных методом ИКД.

На рис. 1 представлена частотная зависимость порогового сигнала в гетеродинном режиме для фотодиода с размером фоточувствительной площадки 300x300 мкм. При частоте 600 МГц порог равен $6 \cdot 10^{-20}$ Вт/Гц, а при 1 ГГц — $4 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц.

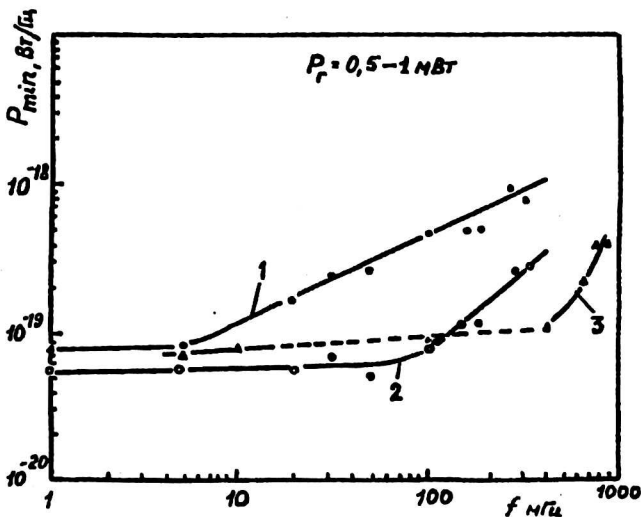


Рис. 1. Частотная зависимость гетеродинного порога фотодиодов на основе КРТ на длину волны 10,6 мкм ($S = \varnothing 300$ мкм):
1, 2 — $I = 5$ мА; 3 — $I = 10$ мА

На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики фотодиодов на спектральный диапазон 3—5 мкм при 80 и 200 К. Оптимальное рабочее смещение 30—50 мВ.

Ширина запрещенной зоны КРТ, в отличие от антимонида индия, суживается при повышении температуры и происходит сдвиг спектральной характеристики в коротковолновую область. Поэтому возможно использование фотодиодов из КРТ на диапазон 3—5 мкм не только при азотной температуре, но и при термoeлектрическом охлаждении до температур 190—200 К.

На рис. 3 приведены частотные зависимости спектра шума фотодиода на 8—12 мкм при температуре 80 К при двух уровнях засветки: комнатным фоном при температуре 180 °С (кривая 1) и уменьшенном в 10 раз (кривая 2).

Фотодиоды изготавливаются методом ионного легирования в пластинах КРТ с концентрацией носителей порядка 10^{16} см⁻³, т. е. намного более высокой, чем в фоторезисторах. Это обеспечивает возможность хорошей очистки и защиты поверхности. Поэтому они менее чувствительны к воздействию проникающих излучений и повышенных температур хранения. За время испытаний: 8 лет хранения при нормальных условиях, многократные термоудары: $-60 \div +60$ °С, выдержка в течение 150 ч при $T = 70$ °С и в течение 300 ч при $T = 60$ °С не привели к заметным изменениям обнаружительной способности [8].

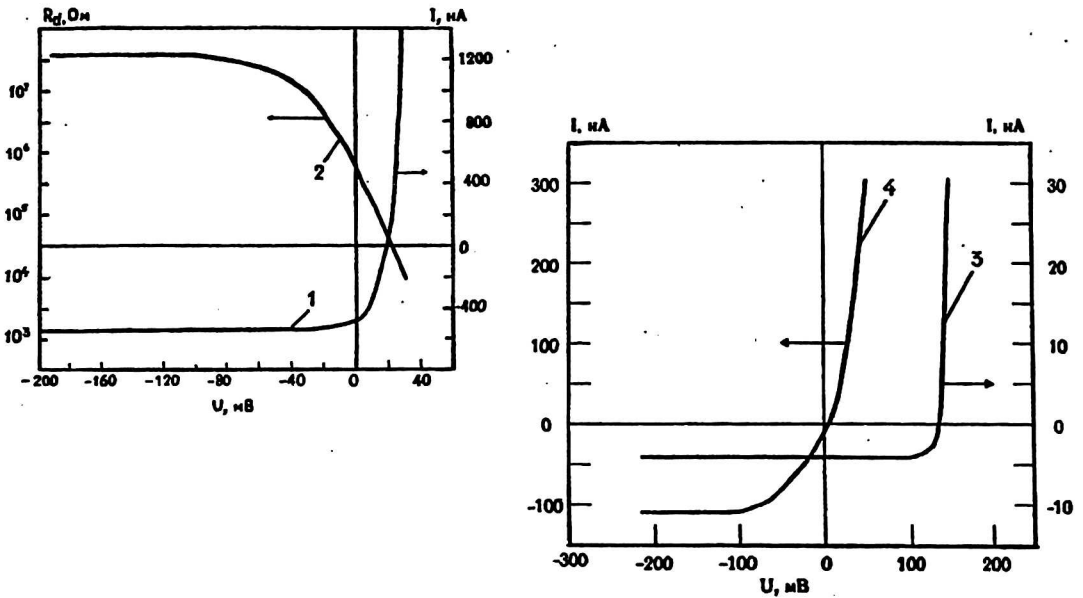


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика и дифференциальное сопротивление фотодиодов: для $\lambda = 8-12$ мкм при $T = 80$ К: кривая 1 — ВАХ; кривая 2 — дифференциальное сопротивление; для $\lambda = 3-5$ мкм: кривая 3 — ВАХ при $T = 80$ К; кривая 4 — ВАХ при $T = 200$ К

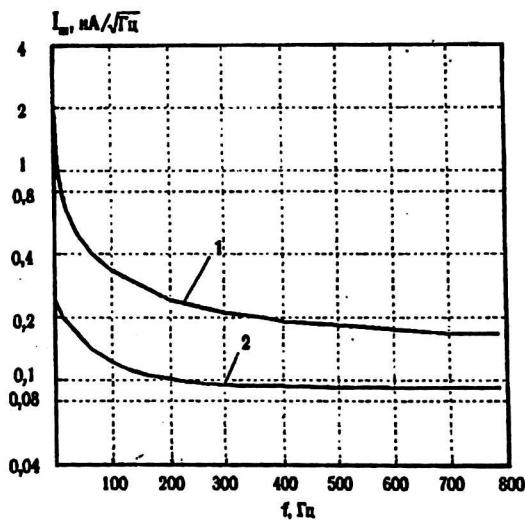


Рис. 3. Частотные зависимости спектра шума фотодиода на $8-12$ мкм при температуре 80 К при двух уровнях засветки: комнатным фоном при апертуре 180° (кривая 1) и уменьшенной в 10 раз (кривая 2)

Многорядные матрицы форматов $4 \times N$ или $2 \times N$ разрабатывались для использования в режиме временной задержки и накопления — ВЗН-режим [3]. ВЗН-режим обеспечивает возможность получения в $N^{1/2}$ -раз большую обнару-

жительную способность, уменьшает ее разброс по каналам, благодаря резервированию повышается процент выхода и стабильность параметров в процессе эксплуатации.

Матричные фотоприемники состоят из расположенных в фокальной плоскости матрицы фотодиодов и кремниевой БИС, обеспечивающей считывание, предварительное усиление, мультиплексирование фотосигналов с каждого фоточувствительного элемента и вывод их из холодной зоны по четырем каналам.

Шаг в каждой линейке равен 60 мкм при размере фоточувствительных площадок $(30 \pm 5) \times (30 \pm 5)$ мкм. Для четкого выделения фоточувствительных площадок вокруг $p-n$ -переходов сформирован дополнительный $p-n$ -переход—стоп-канал. Он разделяет фотодиоды и собирает фотоносители, созданные светом между ними. Мультиплексор и фотодиодная матрица с помощью индиевых столбиков стыковались с контактным растром.

Свет на фотодиодную матрицу попадает через подложку эпитаксиального слоя. Подложка толщиной 600 мкм была из $Cd_{0,96}Zn_{0,04}Te$. Обнаружительная способность МФП, включающей четыре линейки по 128 элементов, при суммировании по двум фотодиодам (2×256) D^* больше $6 \cdot 10^{10}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2}, а при суммировании по четырем (4×128) — около $9 \cdot 10^{10}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2}.

“Смотрящие” матрицы включают в себя матрицу фоточувствительных элементов формата $L \times N$, аналогичную ей матрицу ключей, изготовленную по $p-n$ -МОП технологии на кремнии и расположенные по бокам кремниевые мультиплексоры, осуществляющие построчное накопление и считывание сигналов с фотодиодов и их вывод из “холодной” зоны. Матрица ключей и фотодиодная матрица стыкуются с помощью индиевых столбиков [4].

В матрицах формата 32×32 шаг был 100 или 70 мкм, в МФП формата 128×128 — 40, а в МФП 384×288 — 35 мкм с размером $p-n$ -перехода 20 мкм. Суммарная высота индиевых столбиков 10 мкм при диаметре 15 мкм. Число “сигнальных” выводов в МФП “смотрящего” типа всего два при общем числе выводов из “холодной” зоны с учетом термодатчиков не более 20 вне зависимости от формата матрицы.

Конструкции МФП предусматривают возможность системы охлаждения как дроссельного типа, так и типа Сплит-Стирлинг.

Большим преимуществом МФП на основе фотодиодов является практически полное отсутствие тепловыделения. Кремниевая матрица ключей и мультиплексор потребляют не более 50—60 мВт.

МФП изготавливались на эпитаксиальных слоях, выращенных методом ИКД (ГУП «НПО “Орион”»), жидкофазной эпитаксией (Гиредмет) и методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ) (ИПФ СО РАН). МФП разрабатывались и изготавливались на диапазоны 1,5—2,5; 3—5 и 8—12 мкм.

Средняя ампер-ваттная чувствительность МФП на диапазон 8—12 мкм была около 4 А/Вт, а для МФП формата 128×128 с граничной длиной волны 2,8 мкм при $T = +300$ К она равнялась 1,1 А/Вт при $D^* = 2,4 \cdot 10^{10}$ Вт⁻¹·см·Гц^{1/2}.

Ампер-ваттная чувствительность МФП на слоях, выращенных методом МЛЭ, была, как правило, раза в полтора ниже, чем на слоях, полученных жидкофазной эпитаксией. Причины такого различия остаются пока непонятными.

Одной из сложных технологических проблем в изготовлении МФП является стыковка фотодиодной матрицы с матрицей ключей. Этот процесс предъявляет жесткие требования к гладкости и плоскостности стыкуемых поверхностей. Кремниевые пластины естественно полностью удовлетворяют этим требованиям. Эпитаксиальные слои КРТ не могут перед изготовлением $p-n$ -переходов поли-

роваться из-за возникновения механононоров, существенно ухудшающих их свойства. Эпитаксиальные слои, получаемые методом МЛЭ, имеют достаточно совершенную поверхность, хотя в ней встречаются отдельные острые иглы. Слои, выращенные методом жидкофазной эпитаксии, нередко имеют волнистую поверхность.

Литература

1. Бовина Л. А., Стафеев В. И., Мещерякова В. П., Ключкин Л. К. Фотоэлектрические свойства $p-n$ -перехода в $Cd_xHg_{1-x}Te$. // Физика и техника полупроводников. 1973. Т. 7. № 12.
2. Стафеев В. И., Куликов К. М., Григорьев В. К., Ложников В. Е., Бовина Л. А. Влияние CO_2 -лазера на характеристики фотодиодов из $Cd_xHg_{1-x}Te$. Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы: Тр. IV Всесоюзного симпозиума. — Львов, 1975. Ч. 5.
3. Бовина Л. А., Бурлаков И. Д., Ильин Ю. К., Климанов Е. А., Мансветов Н. Г., Соляков В. Н., Стафеев В. И. Многорядные КРТ-фотоприемные устройства для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм. // Оптический журнал. 1996. № 6.
4. Бовина Л. А., Болтарь К. О., Бурлаков И. Д., Климанов Е. А., Потрашин А. И., Сагинов Л. Д., Стафеев В. И., Тимофеев А. А. Фокальные матрицы на основе КРТ-фотодиодов для спектральных диапазонов 3—5 и 8—12 мкм. // Там же.
5. Бовина Л. А., Стафеев В. И., Мещерякова В. П., Григорьев В. К., Банин Е. С. Эпитаксиальные слои $Cd_xHg_{1-x}Te$ и $p-n$ -переходы на их основе. Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы: Тр. III Всесоюзного симпозиума. — Львов, 1972.
6. Бовина Л. А., Головин С. В. Тонкие слои КРТ, полученные методом "горячей стенки". Полупроводники с узкой запрещенной зоной и полуметаллы: Матер. VIII Всесоюзного симпозиума. — Львов, 1991. Ч. II.
7. Головин С. В., Горшков А. В., Бовина Л. А., Болтарь К. О., Стафеев В. И. Свойства эпитаксиальных слоев $Cd_xHg_{1-x}Te$, выращенных из паровой фазы в квазизамкнутой системе // Оптический журнал. 1996. № 6.

CADMIUM MERCURY TELLURIDE PHOTODIODES AND FOCAL PLANE ARRAYS

L. A. Bovina, V. I. Stafeev

The State Unitary Enterprise "RD&P Center "Orion", Moscow, Russia

Single element Cadmium Mercury Telluride (CMT) LWIR and MWIR photodiodes have been investigated. High speed up to 1 GHz heterodyne mode detectors are included. Topology and technology features of 32x32, 128x128, 384x288, 4x16, 4x48, 2x96, 2x128, 2x256 LWIR and MWIR Focal Plane Arrays (FPA) produced on the base of CMT crystals and epitaxial layers are discussed. Temporary and temperature photodiodes stability and future FPA development are analyzed.