ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2020, № 1, с. 144–150

ЛАБОРАТОРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 539.25.085.332+681.2:531.7+681.2-5

ПРЕДУСИЛИТЕЛЬ ДЛЯ CdHgTe-ФОТОДЕТЕКТОРА

© 2020 г. Д. В. Казанцев[a,b,*], Е. А. Казанцева[c]

[a] Институт теоретической и экспериментальной физики им. А.И. Алиханова
Россия, 117219, Москва, ул. Большая Черемушкинская, 25

[b] Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе
Россия, 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, 23

[c] Московский технологический университет МИРЭА
Россия, 119454, Москва, просп. Вернадского, 78

*e-mail: kaza@itep.ru

Поступила в редакцию 28.08.2019 г.
После доработки 26.09.2019 г.
Принята к публикации 27.09.2019 г.

Описана схема предусилителя для работы с азотоохлаждаемым фотодетектором инфракрасного излучения (600 нм–15 мкм) на основе HgCdTe, работающим в режиме фотопроводимости. Применение современных микросхем позволило довести ширину полосы отклика до 2 МГц при уровне шумов 0.5 нВ/Гц$^{1/2}$, что близко к фундаментальному пределу, задаваемому сопротивлением фоточувствительного элемента. Предусилитель использовался в безапертурном сканирующем ближнеполевом оптическом микроскопе.

DOI: 10.31857/S0032816220010218

ВВЕДЕНИЕ

В оптических приборах среднего инфракрасного (и.к.) диапазона (длина волны 5–15 мкм) широко применяются [1, 2] фотоприемники на основе узкозонного твердого раствора кадмий–ртуть–теллур (КРТ) [3–5]. Для снижения уровня электрических шумов, определяющих оптическую чувствительность фотодетектора, чувствительный элемент охлаждают до температуры жидкого азота [6]. Следует отметить, что технология изготовления и.к.-детекторов, основанных на измерении фотопроводимости, относительно давно [7] приблизилась к фундаментальным ограничениям в отношении спектральной чувствительности и уровня шумов. За прошедшее время список основных фирм-производителей не претерпел существенных изменений: Teledyne Judson Technologies (модели J15Dxx), Infrared Assotiates (модели MCT-13-xx, FTIR-16-xx) и Hamamatsu (модель P7752-10).

В фотопроводящую ячейку от внешнего источника (например, через высокоомный резистор) подается ток смещения, и падение напряжения на ней, изменяющееся под действием падающего на ячейку света, измеряется усилителем напряжения с относительно высокоомным входом.

Ширина частотного диапазона отклика фотопроводящих и.к.-детекторов на основе КРТ составляет несколько мегагерц [5]. В справочных данных фирм-изготовителей приводятся следующие постоянные времени: Infrared Assotiates: FTIR-16 – 0.2 мкс, FTIR-22 – 0.2 мкс; Teledyne Judson Technologies: J15D12-M204-S01M – 0.5 мкс, J15D22-M204-S01M-60 – 0.1 мкс. Разумно требовать, чтобы предусилитель оптического сигнала не ограничивал полосу частот фотоприемника в целом. В фурье-спектромерах недостаточная скорость отклика фотоприемника снизит скорость получения одиночной интерферограммы. В безапертурном сканирующем ближнеполевом оптическом микроскопе (б.с.б.о.м.) недостаточная скорость отклика фотодетектора приведет к неточному воспроизведению оптического отклика сканирующей иглы, который резко изменяется в момент касания иглой образца. Система поддержания иглы в состоянии “почти касания” исследуемой поверхности в б.с.б.о.м., как правило, подобна динамическому режиму атомно-силового микроскопа [8], известному под названием TappingMode [9], в котором степень контакта иглы с поверхностью определяется по изменению режима вынужденных колебаний кремниевого кантилевера на частоте его механического резонанса. При типичной частоте нормальных колебаний иглы 30–300 кГц время “оптического касания”, когда кончик иглы вступает в оптическое ближнепольное взаимодействие с образцом, составляет 5–10% периода, и соответствующее этому время оптического импульса, излучаемого иглой,

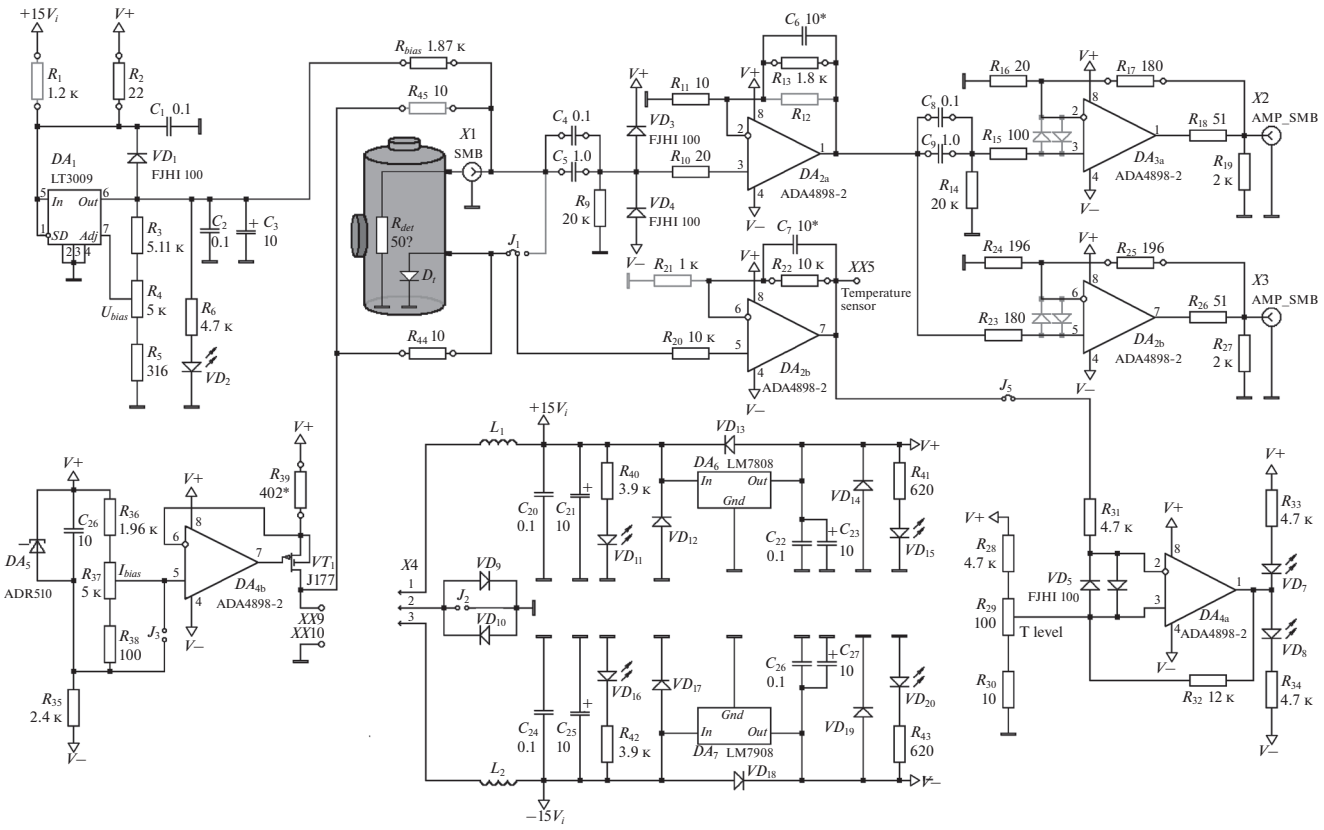

Рис. 1. Общая схема предусилителя для работы с фоторезистивным инфракрасным HgCdTe-фотоприемником, охлаждаемым жидким азотом.

оказывается порядка микросекунды и меньше. С учетом соотношений Крамерса–Кронига недостаточная ширина амплитудной частотной характеристики фотодетектора приведет в этом случае к фазовым искажениям собираемого сигнала, в результате чего оптический сигнал перестанет быть однозначной функцией зазора игла–образец, каким он должен быть.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА ПРЕДУСИЛИТЕЛЯ

Принципиальная схема платы предусилителя для совместной работы с КРТ-фотоприемником, работающим в фоторезистивном режиме, приведена на рис. 1. Ток смещения на фоточувствительный элемент подается через резистор R_{bias}. Фоточувствительный элемент находится в охлаждаемом жидким азотом дюаре с оптическим окном. Вариации напряжения, возникающие на фоточувствительном элементе, попадают на вход первого каскада усилителя (микросхема DA_{2a}). Коэффициент усиления K_1 каскада определяется [10] соотношением номиналов резисторов обратной связи: $K_1 = \dfrac{R_{13} + R_{11}}{R_{11}}$ и равен в нашем случае 10. Поскольку нас не интересует постоянная составляющая напряжения оптического сигнала, и напряжение смещения, возникающее на фоточувствительном элементе, довольно велико (100–200 мВ), мы установили на входе каскада переходную емкость $C_4 \| C_5$. Один из конденсаторов (C_5) обеспечивает достаточную для передачи низких частот емкость, а второй (C_4), выполненный из высококачественной керамики, предназначен для оптимизации передачи верхних частот спектра сигнала. Входной каскад микросхемы DA_{2a} защищен парой диодов VD_3, VD_4, не допускающих выхода напряжения на входе каскада за пределы напряжений питания. Для снижения влияния шумов обратного тока диодов на входной сигнал мы использовали диоды FJH1100 с малым (10 пА) обратным током [11]. Характерные номиналы резисторов мы установили согласно рекомендациям производителя [12], имея в виду, что микросхема ADA4898-2 сравнительно низкоомная и высокочастотная [13]. Номинал резистора R_{10}, подключенного к неинвертирующему входу, выбран равным номиналу резистора R_{11}, заземляющего инвертирующий вход.

Для дальнейшего усиления сигнал попадает на вход второго каскада. Достаточная площадь пе-

чатной платы (мы используем размер 50 × 75 мм, соответствующий размеру экранирующего кожуха Hammond MFC 1550) позволила нам расположить на ней параллельно два каскада с разным коэффициентом усиления. Благодаря этому возможность изменения чувствительности фотоприемной системы в целом сообразно размаху вариаций принимаемой световой мощности (например, при смене используемой линии генерации возбуждающего лазера в системе б.с.б.о.м.) позволяет нам более полно использовать динамический диапазон *АЦП* на входе аппаратуры для дальнейшей обработки собранного оптического сигнала или подключить осциллограф для контроля формы собираемого сигнала.

Коэффициенты усиления каскадов на DA_{3a} и DA_{3b} установлены равными ×10 и ×2 соответственно, обеспечивая усиление ×1000 и ×200 по отношению к сигналу фоточувствительного элемента. Резисторы R_{18} и R_{26} предназначены для ограничения выходного тока операционного усилителя *ОУ* при работе на нагрузку 50 Ом. Для подачи тока смещения на фоточувствительный элемент (использованный нами фотодетектор J15D12-M204-S100U-60 площадью 100 × 100 мкм^2 производства Judson требует, согласно паспорту, ток смещения 2.6 мА для достижения максимального отношения сигнал/шум) в схеме используется резистор R_{bias}, подключенный противоположным концом к регулируемому источнику стабильного напряжения на микросхеме DA_1 (LT3009). Грубо ток смещения задается путем подбора резистора R_{bias}, а его точная регулировка возможна с помощью потенциометра R_4. Напряжение на своем управляющем входе микросхема-стабилизатор DA_1 поддерживает равным 600 мВ путем регулировки напряжения на своем выходе.

Стабилизированный источник тока на транзисторе VT_1, управляемом *ОУ* DA_5, предназначен для измерения температуры фоточувствительного элемента. В некоторых моделях фотоприемников (например, Judson) внутри дюара устанавливается диод D_t, через который извне пропускается калиброванный ток (1 мкА), и измеряемое напряжение на нем зависит от температуры диода. Малость утечек тока МОП-транзистора с изолированным затвором гарантирует, что практически весь выходной ток вызывает падение напряжения на токоизмерительном резисторе R_{39}, и *ОУ* DA_{4b} стабилизирует ток транзистора путем сравнения напряжения на R_{39} с напряжением на “стабилитроне” DA_5 AD510. Для общих применений (миллиамперные токи) достаточно транзистора J177, для генерации микроамперных токов лучше использовать 3N363 с пикоамперным током утечки канала.

Повторенный (усиленный) каскадом DA_{2b} сигнал постоянного тока может быть выведен наружу для контроля, а также использован прямо на плате для индикации выкипания охлаждающего фотоприемник жидкого азота. В большинстве случаев дюар фотоприемника не комплектуется термоизмерительным диодом. С учетом этого при разводке печатной платы предусмотрен вариант, когда напряжение для контроля теплого/холодного состояния фоточувствительного элемента подается на вход повторителя DA_{2b} не с термочувствительного диода, а с КРТ-элемента. Для этого следует переставить перемычку на трехпиновом разъеме J_1. При повышении температуры фотодетектора его сопротивление уменьшается, и напряжение на фоточувствительном элементе падает. Компараторный каскад DA_{4a}, порог срабатывания которого настроен цепочкой $R_{28}R_{29}R_{30}$ (в качестве опорного уровня выбрано напряжение питания), вместо зеленого светодиода включает красный.

Для снижения потребляемой мощности операционные усилители переведены производителями со стандарта питания ±15 В на стандарт питания ±5 В. В системе с низким рабочим напряжением питания величина тока смещения, который подается на светочувствительный элемент через резистор от источника опорного напряжения, может оказаться недостаточной. Для сохранения приемлемой чувствительности фотоприемника и линейности его отклика внутреннее сопротивление источника тока смещения должно быть достаточно большим (заметно больше, чем собственное сопротивление светочувствительного элемента). Опорное напряжение, создающее совместно с балластным сопротивлением R_{bias} необходимый ток, может превышать имеющееся в системе напряжение ±5 В. В такой ситуации возможно использование прецизионного генератора тока на транзисторе VT_1 под управлением *ОУ* DA_{4b} в качестве источника тока смещения, подаваемого не на диод D_t – датчик температуры (который редко устанавливается в дюар фотоприемника фирмами-изготовителями), а на фоточувствительный элемент. В этом случае следует использовать токоизмерительный резистор R_{45}, который на принципиальной схеме обозначен светло-серым цветом.

В такой схеме включения измерение температуры фоточувствительного элемента по падению напряжения на нем оказывается также возможным. Сопротивление фоточувствительного элемента зависит от температуры, напряжение на нем может быть измерено усилителем-повторителем DA_{2b} и затем выведено в качестве дополнительного сигнала для контроля или использовано в “компараторе” индикации выкипания жидкого азота на *ОУ* DA_{4a}, который зажигает один из светодиодов – VD_7 или VD_8. На печатной плате предусмотрена возможность легкого отключения входа

DA_{2b} путем снятия перемычки J_1 в случае, если воздействие входа *ОУ* DA_{2b} на собираемый сигнал окажется заметным. По нашим наблюдениям, дополнительное подключение на входе схемы к элементу детектора входа микросхемы DA_{2b} не приводит к заметному увеличению уровня шумов на сигнальном выходе (DA_{3a} и DA_{3b}).

Между тем использование микросхемы DA_{4b} с транзистором VT_1 в качестве малошумящего источника микроамперного тока является, скорее, экзотическим шагом, поскольку рекордно низкий уровень шумов при измерении температуры лишен смысла, а требуемый ток смещения фоточувствительных элементов обычно велик (малость характерных для схемы токов затрудняет создание скоростных фотоприемников с приемлемой полосой частот отклика).

Для исключения воздействия на собранный сигнал помех, приходящих по цепям питания, на плате установлен электронный фильтр из двух стабилизаторов напряжения DA_6 и DA_7 (LM7808 и LM7908 соответственно). Перемычка J_2, допускающая разрыв цепи “земли”, приходящей по разъему питания, позволит использовать в качестве провода “земли” экранирующую оплетку сигнального кабеля, соединяющего с системой дальнейшей обработки сигнала, в случае, если это будет целесообразным для нейтрализации “петель земли”, возникающих в измерительной системе при работе. Чтобы исключить недопустимое напряжение питания в схеме (в случае, когда цепь “земли” по ошибке окажется не подсоединенной к плате), параллельно с перемычкой J_2 впаяна встречная пара диодов VD_9 и VD_{10}. Диоды VD_{12} и VD_{17} предохраняют электронику от ошибки в полярности подсоединения проводов питания. Диоды VD_{13} и VD_{18} предохраняют регулирующие каскады стабилизаторов от импульса обратной полярности при выключении аппаратуры (напряжение питания внешнего источника может исчезнуть раньше, чем разрядятся фильтрующие емкости C_{23} и C_{27} в положительной и отрицательной цепях питания платы под действием потребляемых элементами платы токов). Диоды VD_{14} и VD_{19} защищают операционные усилители в случае отказа одной из микросхем питания.

Большинство элементов, использованных на печатной плате, – миниатюрные и предназначены для SMD (surface mounted device) монтажа. Однако для сменных компонентов (для точных резисторов, задающих рабочие токи и коэффициенты усиления каскадов, для разделительных емкостей, а также для подстроечных конденсаторов, предотвращающих самовозбуждение каскадов) предусмотрены контактные гнезда, позволяющие легко вставить/извлечь элемент. Размер таких элементов на печатной плате соответствует резистору МЛТ-05. Согласно [10], в качестве резисторов, определяющих коэффициенты усиления каскадов и задаваемые электронными узлами напряжения или токи, мы использовали резисторы с точностью номиналов 0.1%. Это позволило не только получить гарантированную точность задаваемых этими резисторами параметров, но и добиться независимости параметров схемы от температуры описываемой электроники. С учетом заметного тепловыделения использованных микросхем (10–12 Вт в алюминиевом корпусе размером 80 × 55 × 25 мм) температура устройства может превышать комнатную на 10–20°C.

УРОВНИ ШУМОВ

Тепловой шум сопротивления фотоприемника в идеале описывается формулой Найквиста. Сопротивление фоточувствительного элемента площадью 100 × 100 мкм^2 в экземпляре фотоприемника Judson J15D12-M204-S100U-60, оказавшегося в нашем распоряжении, составляет при рабочей температуре 51 Ом. Таким образом, при $T = 77$ K (оптимальная температура фотодетектора составляет около 80 K [5], и для ее оценки разумно принять температуру кипения жидкого азота) спектральная плотность шума, соответствующего фундаментальному минимуму, составляет $4kTR_{det} = 0.48$ нВ/$\sqrt{\text{Гц}}$. Уровень входного шума использованных операционных усилителей ADA4898-2 составляет, согласно спецификации производителя, 0.9 нВ/$\sqrt{\text{Гц}}$, что весьма близко к ожидаемому фундаментальному пределу, задаваемому сопротивлением чувствительного элемента.

Спектры выходных шумов усилителя приведены на рис. 2. Для сравнения здесь же приведены спектры сигнала в “теплом” состоянии детектора (фотоприемник находится при комнатной температуре) и в “холодном” (рабочем), когда дюар залит для охлаждения жидким азотом. Некоторое увеличение уровня шума при охлаждении чувствительного элемента от комнатной до рабочей температуры объясняется малым сопротивлением полупроводникового КРТ-элемента при комнатной температуре. Это сопротивление, помимо того что само генерирует меньшую амплитуду шума Найквиста (термодинамического), еще и шунтирует шум соседних элементов. Шумовые спектры системы в теплом состоянии могут быть использованы как оценка уровня шумов, вносимых собственно электроникой.

Из рис. 2 следует, что до частоты ~50–70 кГц заметную часть шума составляют компоненты со спектром $1/f^{\alpha}$. Выше 50 кГц спектр шума становится белым. Этот факт следует иметь в виду при выборе режима работы измерительного прибора в

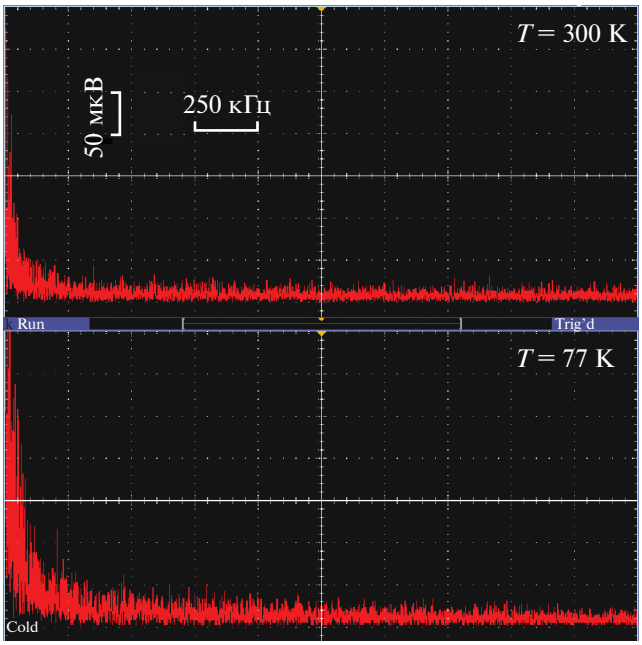

Рис. 2. Спектр шума на выходе усилителя DA_{3a} (усиление ×1000 по отношению к входу) для теплого (вверху) и холодного (внизу) состояния фотоприемника.

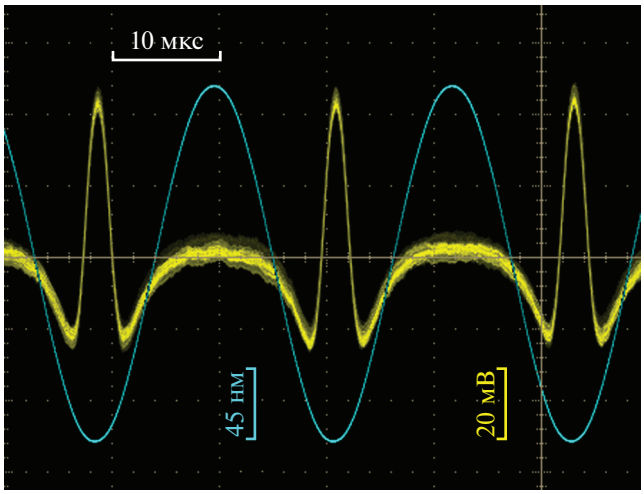

Рис. 3. Сигнал фотоотклика детектора в системе б.с.б.о.м. при использовании в качестве образца кристаллического SiC. Синусоидальная кривая – высота острия иглы над поверхностью образца (f_{tap} = = 42.3 кГц). В момент "касания" иглой поверхности поляризуемость иглы резко изменяется за счет ближнепольного взаимодействия острия с материалом образца, что приводит к появлению резкого импульса, искажающего синусоидальную форму сигнала.

целом (фурье-спектрометра, ближнепольного оптического микроскопа и т.п.): скорость изменения оптического потока необходимо установить таким образом, чтобы интересующие исследователя компоненты сигнала оказались в "малошумной" области спектра. Следует отметить, что часть вида $1/f^{\alpha}$ в шумовом спектре входного каскада описываемого предусилителя (наблюдаемом при теплом фоточувствительном элементе) приблизительно соответствует по мощности и частоте среза шуму самого фоточувствительного элемента. Шумовые свойства КРТ-фотоприемников рассмотрены подробно в [14].

ЧАСТОТНЫЙ ДИАПАЗОН ПРЕДУСИЛИТЕЛЯ

Сигнал фотоотклика, собираемого в б.с.б.о.м. на выходе детектирующей схемы Майкельсона [15], приведен на рис. 3. В этой системе часть когерентного лазерного луча проходит через светоделитель и фокусируется на зондирующую иглу. Для работы обратной связи в режиме "Tapping-Mode" [9] игла совершает вынужденные колебания с амплитудой 50–100 нм по нормали к поверхности образца. Металлизированная игла с точки зрения классической радиофизики представляет собой штыревую дипольную антенну. Падающий на нее луч возбуждает в ней продольные дипольные колебания на частоте лазерного света. В момент "прикосновения" острия иглы к поверхности конец иглы "заземляется" сообразно диэлектрическим свойствам поверхности в "пятне контакта" под острием, оптическая поляризуемость иглы изменяется, и сообразно этому изменяется амплитуда и фаза рассеянного иглой света. Свет, рассеянный иглой, возвращается на светоделитель и отражается от него на фотоприемник. Другая часть лазерного луча, направленная светоделителем в опорное плечо интерферометра Майкельсона, отражается в нем от глухого зеркала и тоже попадает на фотоприемник. Когерентность сигнального и опорного лучей позволяет обеспечить оптическое гомодинирование.

В качестве образца нами был использован кристаллический карбид кремния, частота решеточных колебаний в котором близка к оптической частоте излучения CO_2-лазера. Благодаря резонансной поляризуемости полярной решетки SiC оптический отклик такого образца в системе б.с.б.о.м. исключительно велик. На рис. 3 видно, что в момент "касания" острием иглы поверхности (нижняя часть синусоидальной кривой, соответствующей колебаниям высоты иглы над поверхностью) в регистрируемом сигнале фототока наблюдается резкий импульс, искажающий синусоидальную форму сигнала фотоотклика. Согласно рис. 3, оптический сигнал практически не отстает по времени от механического (не более чем на 0.7 мкс). Эта задержка соответствует заявлен-

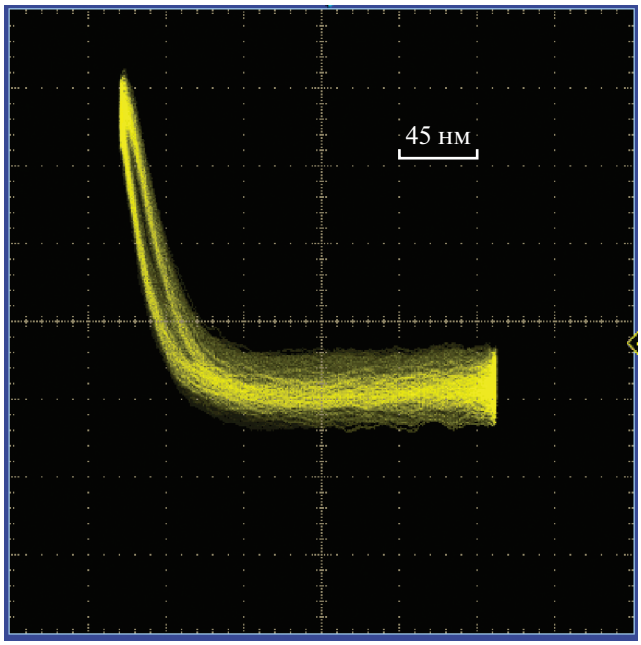

Рис. 4. Сигнал фотоотклика детектора в системе б.с.б.о.м. (вертикальная ось), записанный в зависимости от удаления иглы-зонда от поверхности (горизонтальная ось) при использовании в качестве образца кристаллического SiC. Совпадение линий подвода и отвода зонда указывает на малость фазовых искажений в усилителях оптического сигнала и сигнала датчика положения (высоты) иглы.

ной в спецификации детектора постоянной времени фоточувствительного элемента 1 мкс.

Сигналы отклонения кантилевера (синусоидальная линия на рис. 3), на котором расположена зондирующая игла, и сигнал фотоотклика детектора, собираемый с помощью описываемого предусилителя (линия с заметным импульсом искажения в момент касания поверхности), могут быть поданы одновременно на входы горизонтального и вертикального отклонения осциллографа в режиме наблюдения фигур Лиссажу (см. рис. 4). Как видно из рис. 4, на частоте колебаний 42 кГц фазовые искажения удовлетворительно малы, ветви подвода и отвода практически совпадают, и фототок является однозначной функцией расстояния игла–поверхность.

Непосредственное электрическое измерение фазочастотной характеристики описываемого предусилителя (на вход через П-образный делитель подавался синусоидальный сигнал с генератора, а выходной сигнал наблюдали на экране осциллографа) показало, что поворот фазы на 45° и уменьшение амплитуды до 70% выходного сигнала происходят на частоте 2.2 МГц.

Таким образом, конструкция предусилителя практически не ограничивает частотный отклик детектирующей системы, и основную роль в ограничении частотной полосы играет сам светочувствительный элемент (время отклика для разных моделей 0.1–1 мкс).

ВЫВОДЫ

Применение современных микросхем позволило создать предусилитель для обработки сигнала оптического датчика в среднем и.к.-диапазоне с уровнем входного шума, близким к фундаментальному пределу ($\sqrt{u^2} \approx 0.5$ нВ/$\sqrt{\text{Гц}}$), с полосой частот 2.2 МГц, соответствующей полосе частот современных детекторов на основе КРТ (1–10 МГц). Это позволило получить удовлетворительную верность сигнала в системе безапертурного б.с.б.о.м. Фазовые искажения практически отсутствуют при частоте колебаний зондирующей иглы 30–100 кГц, в результате чего оптический сигнал можно считать однозначно соответствующим механическому удалению острия иглы от поверхности.

БЛАГОДАРНОСТИ

Разработка и изготовление малошумящего скоростного предусилителя сигнала для КРТ-фотоприемника проводились благодаря финансовой поддержке гранта 18-29-20122 РФФИ в рамках проекта б.с.б.о.м.-исследования поверхности полупроводников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Hudson R.D.* Infrared system engineering. N.Y.: Wiley, 1969, ISBN 0471418501.
2. *Moore J.H., Davis C.C., Coplan M.A., Greer S.C.* Building Scientific Apparatus. Cambrifge: Cambridge University Press, 2009. ISBN 978-0-521-87858-6.
3. *Пономаренко В.П.* // Успехи физических наук. 2003. Т. 173. С. 649. https://doi.org/10.3367/UFNr.0173.200306c.0649
4. *Rogalski A.* // Reports on Progress in Physics. 2005. V. 68. P. 2267. https://doi.org/10.1088/0034-4885/68/10/R01
5. *Leong T.C., Hooman M.* // Nanophotonics. 2018. V. 7. Issue 1. P. 169. https://doi.org/10.1515/nanoph-2017-0061
6. *Frederick J.R., Kimchi J., Wong T.T.S.* // Proc. SPIE. 1996. V. 2812. P. 528 https://doi.org/10.1117/12.254097
7. *Józwikowska A., Józwikowski K., Rogalski A.* // Infrared Physics. 1991. V. 31. P. 543. https://doi.org/10.1016/0020-0891(91)90141-2
8. *Martin Y., Williams C.C., Wickramasinghe H.K.* // Journal of Applied Physics. 1987. V. 61. P. 4723. https://doi.org/10.1063/1.338807
9. *Zhong Q., Inniss D., Kjoller K., Elings V.* // Surface Science Letters. 1993. V. 290. P. L688. https://doi.org/10.1016/0167-2584(93)90906-Y

10. *Хоровиц П., Хилл У.* Искусство схемотехники. В 2-х т. / Пер. с англ. / Под ред. М.В. Гальперина. М.: Мир, 1983.

11. Fairchild Semiconductor FJH1100 Datasheet. http://pdf.datasheetcatalog.com/datasheet/fairchild/FJH1100.pdf

12. Analog Devices AN-581 Application Note, https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/application-notes/AN-581.pdf

13. Analog Devices ADA4898 Datasheet: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADA4898-1_4898-2.pdf

14. *Kimchi J., Frederick J.R., Wong T.T.S.* // Proc. SPIE. 1996. V. 2812. P. 540. https://doi.org/10.1117/12.254098

15. *Keilmann F., Hillenbrand R.* // Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2004. V. 362. P. 787. https://doi.org/10.1098/rsta.2003.1347