

УДК 535.231.62 : 535-14 : 535-45

**ПРИМЕНЕНИЕ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ МАТРИЧНЫХ
МИКРОБОЛОМЕТРИЧЕСКИХ ПРИЁМНИКОВ
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ
ТЕРАГЕРЦОВОГО СПЕКТРАЛЬНОГО ДИАПАЗОНА**

М. А. Демьяненко¹, Д. Г. Есаев¹, И. В. Марчишин¹, В. Н. Овсяк¹,
Б. И. Фомин¹, Б. А. Князев^{2,3}, В. В. Герасимов^{2,3}

¹ Учреждение Российской академии наук
Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 13
E-mail: esaev@thermo.isp.nsc.ru

² Учреждение Российской академии наук
Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера Сибирского отделения РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

³ Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Новосибирский государственный университет»,
630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 2

Приведены результаты анализа механизма возникновения чувствительности матричных микроболометрических приёмников на основе оксида ванадия к терагерцовому излучению. Представлены экспериментальные данные исследований возможностей повышения в несколько раз чувствительности микроболометрических приёмников в терагерцовом диапазоне путём использования дополнительного тонкого металлического поглощающего слоя, наносимого на мембрану микроболометра. Обнаружена поляризационная зависимость чувствительности микроболометров в терагерцовом и дальнем инфракрасном спектральных диапазонах. Показано, что чувствительность микроболометров в терагерцовом диапазоне обусловлена поглощением излучения в узких металлических шинах, нанесённых на опорные ножки микроболометров и выполняющих роль омического контакта между термочувствительным слоем и схемой обработки.

Ключевые слова: неохлаждаемый микроболометр, оксид ванадия, терагерцовое излучение, поляризация, чувствительность, микроантенна, лазер на свободных электронах.

Введение. Наиболее чувствительными приёмниками терагерцового излучения являются глубоко охлаждаемые сверхпроводниковые болометры, сопряжённые с приёмной антенной [1, 2]. Такие приёмники, обычно одиночные, используются для детектирования малых сигналов, например, в радиоастрономии и в системах обнаружения, регистрирующих пассивное терагерцовое излучение, испускаемое самим наблюдаемым объектом. В системах с активной подсветкой, применяющих мощные терагерцовые излучатели (такие как квантовые каскадные лазеры [3] и лазеры на свободных электронах [4]), столь высокая чувствительность не требуется и актуальными становятся высокое пространственное разрешение, скорость визуализации объектов и удобство использования приёмников. Эти задачи могут быть решены с помощью неохлаждаемых матричных микроболометрических приёмников (ММБП) форматом 320×240 элементов и более, пороговая мощность которых 30 нВт/пиксель в терагерцовом диапазоне [5–7]. Однако для мобильных систем, обладающих менее мощными излучателями, такой чувствительности недостаточно.

В данной работе представлены результаты исследования возможностей дальнейшего повышения чувствительности микроболометров в терагерцовом диапазоне путём нанесения на мембрану дополнительного тонкого металлического поглощающего слоя, а также экспериментальные зависимости поляризационной чувствительности ММБП в дальнем

инфракрасном и терагерцовом диапазонах, способствующие выяснению механизма поглощения терагерцового излучения в микроболометрах.

Поглощение терагерцового излучения в конструктивных элементах болометра. В работе [7] исследовалось поглощение терагерцового излучения в слоях VO_x , выращенных на сапфировой подложке. Такая подложка достаточно сильно поглощает излучение в диапазоне длин волн 5–200 мкм, что не позволило надёжно оценить величину поглощения излучения с длиной волны 130 мкм, которое использовалось для измерения чувствительности микроболометров. Однако был сделан вывод о малости поглощения.

В целях уточнения величины поглощения терагерцового излучения слои VO_x со словесым сопротивлением $R_S = 28, 55$ и 90 кОм выращивались на германиевой подложке, прозрачной в широком диапазоне длин волн. На подложку осаждался сплошной слой нитрида кремния толщиной 40 нм [8], затем на одну половину подложки методом золь-гель наносился слой VO_x толщиной 50 нм и вновь осаждался сплошной пассивирующий слой нитрида кремния толщиной 40 нм. Измерения коэффициентов пропускания и отражения проводились на обеих половинах каждой подложки, что позволяло точнее определять величину поглощения в слоях оксида ванадия. Спектры пропускания указанных трёх образцов показывают, что в используемых слоях VO_x поглощения излучения с длинами волн более 100 мкм не происходит. При длинах волн менее 20 мкм коэффициент поглощения излучения в свободно висящей плёнке VO_x возрастает от 0 до 2,2 и 4,4 % по мере уменьшения слоевого сопротивления оксида ванадия от 90 до 55 и 28 кОм соответственно.

Использование дополнительного металлического поглотителя. Ввиду малой величины поглощения излучения терагерцового диапазона в конструктивных материалах микроболометра необходимо использование дополнительных поглотителей. Известно, что тонкие свободные металлические плёнки со слоевой проводимостью, равной 188 Ом, поглощают до 50 % падающего излучения независимо от длины волны в субмиллиметровом диапазоне. При наличии зеркала, размещённого параллельно металлической плёнке на расстоянии, равном четверти длины волны излучения, поглощение может увеличиваться до 100 % при слоевом сопротивлении плёнки 377 Ом. В матричных микроболометрах такая металлическая плёнка расположена над подложкой с зеркалом на расстоянии порядка 3 мкм, что много меньше длины волны терагерцового излучения, следовательно, она находится близко к узлу стоячей волны. Это существенно ослабляет поглощение, которое может быть повышено путём выбора оптимального слоевого сопротивления металлической плёнки. Расчёт величины поглощения излучения в протяжённой тонкой металлической плёнке, подвешенной над зеркалом на высоте 3,2 мкм, показал, что для излучения с длиной волны 130 мкм оптимальным является слоевое сопротивление 65 Ом. При этом величина поглощения достигает 22 %.

Для проверки эффективности применения тонкого металлического поглотителя были изготовлены ММБП, состоящие из двух рядом расположенных матриц микроболометров: одна форматом 320×182 элемента с дополнительным металлическим поглотителем, имеющим слоевое сопротивление металла 70 Ом, другая форматом 320×58 элементов без металлического поглотителя.

Поляризационная зависимость чувствительности микроболометров. Для измерения относительной чувствительности ММБП в терагерцовом диапазоне использовали излучение Новосибирского лазера на свободных электронах, которое одновременно освещало рядом расположенные микроболометры с металлическим поглотителем и без него, что позволяло надёжно сравнить чувствительности разных типов болометров. При вращении ММБП относительно плоскости поляризации излучения были получены угловые зависимости чувствительности микроболометров L -типа (имеющих большое расстояние между контактами в слое оксида ванадия), которые представлены на рис. 1. Видно, что

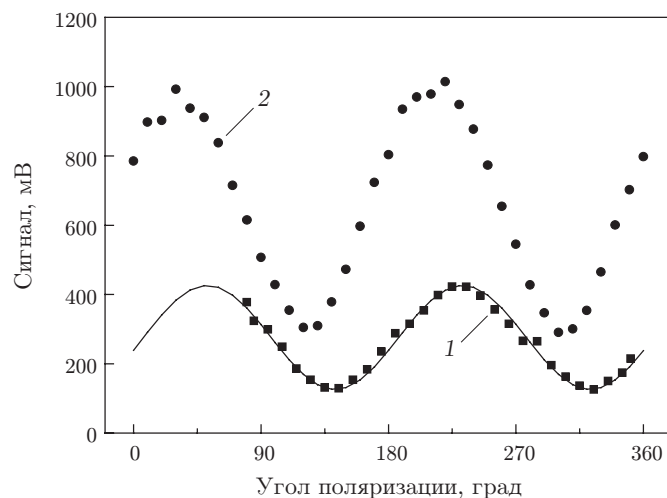


Рис. 1. Зависимости выходного сигнала микроболметра L -типа (без металлического поглотителя (1) и с металлическим поглотителем (2)) от угла поляризации излучения

чувствительность микроболметров с дополнительным металлическим поглотителем превышает значение чувствительности микроболметров без металлического поглотителя в 1,5–4 раза в зависимости от угла поляризации излучения.

Такая зависимость (рис. 2) более ярко выражена для S -типа микроболметра (расстояние между контактами термочувствительного слоя и схемы считывания в подложке меньше, чем в L -типе). Минимальная чувствительность наблюдается при направлении электрического поля поперёк узких металлических полосок, обеспечивает минимальную возможность нагрева термоэлемента и составляет около 2 % от максимальной чувствительности; максимальная — вдоль металлических полосок (вызвана увеличением выделяемой тепловой мощности в длинных полосках, пропорциональной их длине) и обеспечивает максимальный тепловой контакт с термочувствительным слоем.

Проведённые эксперименты показывают:

1. Поглощение терагерцового излучения происходит в подводящих контактах.

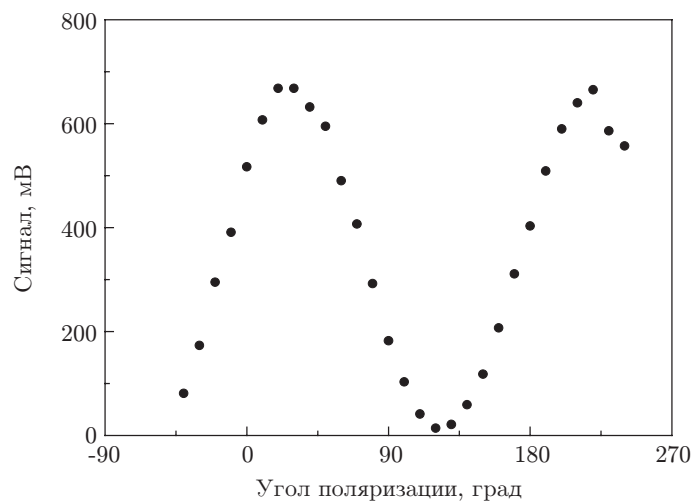


Рис. 2. Зависимость выходного сигнала микроболметров S -типа без тонкого металлического поглотителя от угла поляризации излучения

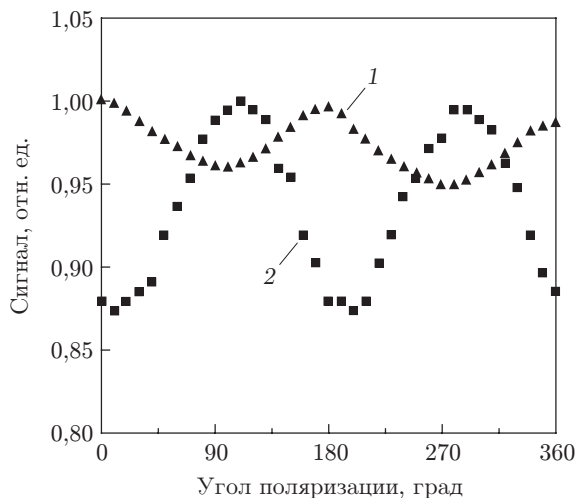


Рис. 3. Зависимости выходного сигнала микроболметра S -типа (без отрезающего фильтра (1) и с отрезающим фильтром (2)) от угла поляризации при освещении тепловым излучением АЧТ с температурой $850\text{ }^{\circ}\text{C}$

2. Поглощение отсутствует в основных «рабочих» элементах микроболметра — слоях нитрида кремния и оксида ванадия.

3. Добавление металлического поглотителя в 1,5–4 раза увеличивает чувствительность в терагерцовом диапазоне.

Обнаружение поляризационной зависимости чувствительности микроболметров в терагерцовом диапазоне с использованием излучения лазера на свободных электронах на длине волны $130\text{ }\mu\text{m}$ стимулировало изучение аналогичных эффектов в различных спектральных диапазонах. На рис. 3 представлены результаты поляризационных зависимостей выходного сигнала при освещении излучением модели абсолютно чёрного тела (АЧТ). Поляризованное излучение получалось с помощью проволочного поляризатора. В одном случае болометр освещался полным излучением АЧТ, в другом — при прохождении через

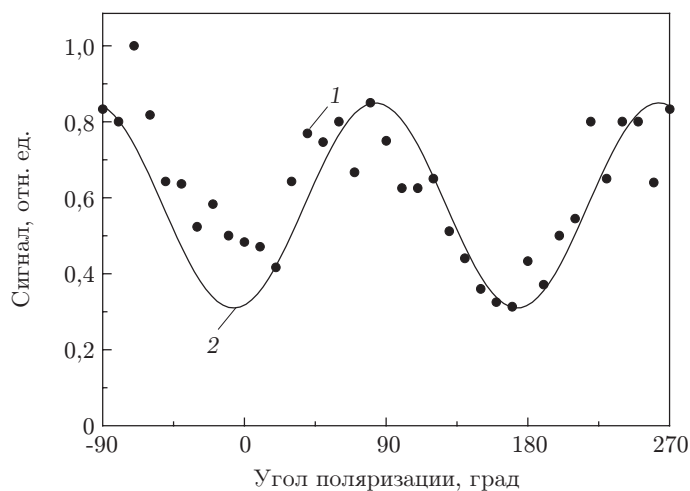


Рис. 4. Зависимость выходного сигнала микроболметра L -типа при освещении поляризованным излучением лазера на свободных электронах (экспериментальные данные (1), аппроксимирующая кривая (2)) от угла поляризации

фильтр, пропускающий излучение с длиной волны более 14 мкм. Видно, что в случае длинноволнового излучения поляризационная зависимость выражена более сильно (модуляция достигает 15 %), чем для полного излучения (модуляция 5–7 %), т. е. в области максимальной чувствительности болометра (8–14 мкм) поляризационные эффекты слабы, а значит, малы и эффекты поглощения излучения в подводющих шинах (микроантеннах). Основной вклад в выходной сигнал даёт прямое поглощение в плёнке нитрида кремния. Напротив, в длинноволновой области вклад поглощения в нитриде кремния мал, а основным является поглощение в подводющих шинах.

На рис. 4 показана поляризационная зависимость чувствительности к излучению с длиной волны 50 мкм. Величина модуляции чувствительности в зависимости от угла поляризации излучения сравнима с ранее наблюдаемой на длине волны 130 мкм, следовательно, в обоих случаях преобладающим является поглощение излучения на тонких металлических шинах.

Заключение. Обнаружение поляризационной зависимости в данной работе позволило однозначно установить, что причина чувствительности заключается в поглощении в подводющих металлических шинах, являющихся своеобразными микроантеннами, а не в поглощении в конструктивных элементах болометра (плёнках нитрида кремния и оксида ванадия). Таким образом, увеличение чувствительности может быть достигнуто путём оптимизации геометрии микроантенн. Показано, что использование тонких металлических плёнок с определённым слоевым сопротивлением как дополнительных поглотителей приводит к увеличению чувствительности в несколько раз. Повышение чувствительности микроболометров к терагерцовому излучению расширяет области их практического применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Luukanen A., Pekola J. P.** A superconducting antenna-coupled hot-spot microbolometer // Appl. Phys. Lett. 2003. **82**, N 22. P. 3970–3972.
2. **Lee A. T., Richards P. L., Nam S. W. et al.** A superconducting bolometer with strong electrothermal feedback // Appl. Phys. Lett. 1996. **69**, N 12. P. 1801–1803.
3. **Williams B. S., Kumar S., Hu Q. et al.** High-power terahertz quantum-cascade lasers // Electron. Lett. 2006. **42**, N 2. P. 89–91.
4. **Bolotin V. P., Vinokurov N. A., Kayran D. A. et al.** Status of the Novosibirsk terahertz FEL // Nucl. Instrum. and Meth. in Phys. Res. 2005. **A543**, N 1. P. 81–85.
5. **Lee A. W. M., Qin Q., Kumar S. et al.** Real-time terahertz imaging over a standoff distance (>25 meters) // Appl. Phys. Lett. 2006. **89**, N 14. 141125.
6. **Dem'yanenko M. A., Esaev D. G., Knyazev V. A. et al.** Imaging with a 90 frames/s microbolometer focal plane array and high-power terahertz free electron laser // Appl. Phys. Lett. 2008. **92**, N 13. 131116.
7. **Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Овсяк В. Н. и др.** Матричные микроболометрические приемники для инфракрасного и терагерцового диапазонов // Оптический журнал. 2009. **76**, вып. 12. С. 5–11.
8. **Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Овсяк В. Н. и др.** Разработка и применение неохлаждаемых матричных микроболометров для терагерцового диапазона // Вестн. НГУ. Сер. Физика. 2010. **5**, вып. 4. С. 82–87.