

**М. А. Демьяненко¹, Д. Г. Есаев¹, В. Н. Овсюк¹, Б. И. Фомин¹, И. В. Марчишин¹,
В. Ш. Алиев¹, Б. А. Князев^{2,3}, В. В. Герасимов^{2,3}, Г. Н. Кулипанов²,
Н. А. Винокуров^{2,3}, В. И. Литвинцев⁴**

¹ Институт физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
пр. Академика Лаврентьева, 13, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: dem_yanenko@thermo.isp.nsc.ru

² Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН
пр. Академика Лаврентьева, 11, Новосибирск, 630090, Россия

³ Новосибирский государственный университет
ул. Пирогова, 2, Новосибирск, 630090, Россия
E-mail: ba_knyazev@phys.nsu.ru

⁴ Институт автоматки и электрометрии СО РАН
прп. Академика Коптюга, 1, Новосибирск, 630090, Россия

РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ НЕОХЛАЖДАЕМЫХ МАТРИЧНЫХ МИКРОБОЛОМЕТРОВ ДЛЯ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДИАПАЗОНА

Представлены экспериментальные результаты исследования возможностей дальнейшего повышения чувствительности неохлаждаемых микроболлометров в терагерцовом диапазоне путем использования дополнительного тонкого металлического поглощающего слоя, наносимого на мембрану микроболлометра. Экспериментально показано, что указанная модификация конструкции микроболлометра приводит к повышению его чувствительности в несколько раз. Обнаружена сильная зависимость чувствительности микроболлометров от угла поляризации терагерцового излучения. Показано, что чувствительность микроболлометров в терагерцовом диапазоне обусловлена поглощением излучения в узких металлических шинах, идущих по ножкам микроболлометров, и в полосках, выполняющих роль омического контакта к термочувствительному слою.

Ключевые слова: неохлаждаемый микроболлометр, оксид ванадия, терагерцовый диапазон, поляризация, чувствительность, микро-антенна, лазер на свободных электронах.

**M. A. Dem'yanenko, D. G. Esaev, V. N. Ovsyuk, B. I. Fomin,
I. V. Marchishin, V. Sh. Aliev, B. A. Knyazev, V. V. Gerasimov,
G. N. Kulipanov, N. A. Vinokurov, V. I. Litvitsev**

DESIGN AND APPLICATION OF UNCOOLED MICROBOLMETER ARRAY FOR THE TERAHERTZ SPECTRAL RANGE

This article presents the results of some experiments on the further improvement in the sensitivity of uncooled microbolometers in the terahertz range via depositing an additional thin metallic absorbing layer on a microbolometer membrane. The experiments have shown the mentioned modification of the microbolometer design increase its sensitivity several times. A strong dependence of the microbolometer sensitivity on the angle of polarization of terahertz radiation has been revealed. It has been shown that the microbolometer responsivity in the terahertz range is caused by the absorption of radiation in the narrow metallic bus going along the microbolometer legs as well as in the strips acting as an ohmic contact with the thermally sensitive layer.

Keywords: uncooled microbolometer, vanadium oxide, terahertz range, polarization, sensitivity, micro-antenna, free electron laser.

Введение

В настоящее время наиболее чувствительными приемниками терагерцового излучения являются криогенные сверхпроводниковые болометры антенного типа [1, 2]. Такие приемники, обычно одиночные или в виде небольших массивов, используются для детектирования малых сигналов, например, в радиоастрономии и в системах обнаружения, использующих пассивное терагерцовое излучение, испускаемое самим наблюдаемым объектом или отражаемое им излучение окружающего фона. В системах с активной подсветкой, использующих мощные терагерцовые излучатели (такие как квантовые каскадные лазеры [3] и лазеры на свободных электронах [4, 5]), столь высокая чувствительность не требуется, и актуальными становятся высокое пространственное разрешение, скорость визуализации объектов и удобство использования приемников. Для решения этих задач могут быть использованы неохлаждаемые матричные микроболометрические приемники (ММБП) форматом 320x240 и более, обладающие пороговой мощностью 30 нВт/пиксель в терагерцовом диапазоне [6, 7]. Однако для мобильных систем, обладающих менее мощными излучателями, такой чувствительности недостаточно.

В настоящей работе представлены результаты исследования возможностей дальнейшего повышения чувствительности микроболометров в терагерцовом диапазоне путем использования дополнительного тонкого металлического поглощающего слоя, наносимого на мембрану микроболометра, а также экспериментальные зависимости чувствительности ММБП от угла поляризации терагерцового излучения и выяснению механизма поглощения этого излучения в микроболомерах.

Поглощение терагерцового излучения в слоях оксида ванадия

Терагерцовое излучение не поглощается в тонких слоях нитрида кремния SiN_x и слабо поглощается в слоях оксида ванадия VO_x , используемых в качестве конструктивных материалов [8], что наряду с малой высотой

подвески микроболометра над зеркалом (примерно 3 мкм) обуславливает значительно большую пороговую мощность, в сравнении с достигаемой в инфракрасном диапазоне, в котором она составляет менее 160 пВт/пиксель. В работе [8] поглощение терагерцового излучения измерялось в слоях VO_x , выращенных на сапфировой подложке, которая достаточно сильно поглощает излучение в диапазоне длин волн 5–200 мкм, что не позволяет сделать надежный вывод о величине поглощения излучения с длиной волны 130 мкм, которое использовалось для измерения чувствительности микроболометров. В настоящей работе, с целью уточнения величины поглощения терагерцового излучения, слои оксида ванадия со слоевым сопротивлением $R_s = 28, 55$ и 90 кОм выращивались на германиевой подложке, прозрачной в широком диапазоне длин волн, за исключением области $200\text{--}500\text{ см}^{-1}$, в которой многофононное поглощение достаточно сильно. На германиевую подложку, отполированную с двух сторон, осаждался сплошной слой нитрида кремния толщиной 40 нм, затем на одну половинку подложки золь-гель методом [9] наносился слой оксида ванадия толщиной 50 нм и вновь осаждался сплошной, пассивирующий слой нитрида кремния толщиной 40 нм. Измерения коэффициентов пропускания и отражения проводились на обеих половинках каждой подложки, что позволяло точнее определять величину поглощения в слоях оксида ванадия.

На рис. 1 приведены спектры пропускания указанных трех образцов (спектры слоев с сопротивлением 55 и 90 кОм сдвинуты вверх на 0,25 и 0,5 единиц, соответственно), из которых видно, что в используемых слоях оксида ванадия поглощения излучения с длинами волн более 100 мкм не происходит. При длинах волн менее 20 мкм наличие слоя оксида ванадия незначительно понижает коэффициент пропускания, что указывает на небольшое поглощение излучения. Это изменение величины пропускания по мере уменьшения слоевого сопротивления оксида ванадия возрастает от 0 % в высокоомных слоях, до 0,6 % при $R_s = 55$ кОм и до 1,2 % при $R_s = 28$ кОм, что соответствует коэффициенту поглощения излучения в свободно висящей пленке, соответственно, равному 0, 2,2 и 4,4 %.

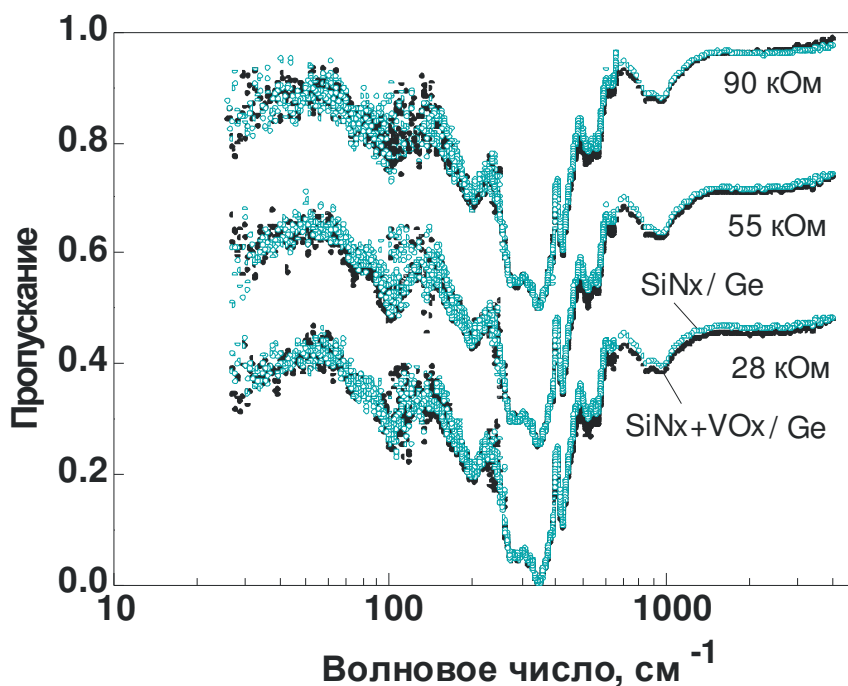


Рис. 1. Спектры пропускания структур $\text{Ge/SiN}_x/\text{SiN}_x$ – светлые точки и $\text{Ge/SiN}_x/\text{VO}_x/\text{SiN}_x$ – темные точки

Дополнительный металлический поглотитель

Малая величина поглощения излучения терагерцового диапазона в конструктивных материалах микроболметра, вплоть до его отсутствия, требует использования дополнительных поглотителей. Известно, что тонкие свободные металлические пленки со слоевой проводимостью равной 188 Ом поглощают до 50% падающего излучения независимо от длины волны в субмиллиметровом диапазоне. При наличии зеркала, расположенного параллельно металлической пленке на расстоянии равном четверти длины волны излучения, поглощение может увеличиваться до 100 % при слоевом сопротивлении пленки равном 377 Ом. В матричных микроболметрах такая металлическая пленка расположена над подложкой с зеркалом на расстоянии порядка 3 мкм, что много меньше длины волны терагерцового излучения, и, следовательно, она находится близко к узлу стоячей волны. Это существенно ослабляет поглощение, которое может быть повышено путем выбора оптимального слоевого сопротивления металли-

ческой пленки. Проведенный нами расчет величины поглощения излучения в протяженной тонкой металлической пленке, подвешенной над зеркалом на высоте 3,2 мкм, показал, что для излучения с длиной волны 130 мкм оптимальным является слоевое сопротивление равное 65 Ом. При этом величина поглощения составляет 22 %.

Для проверки эффективности применения тонкого металлического поглотителя были изготовлены ММБП состоящие из двух массивов микроболметров: один форматом 320x182 – с дополнительным металлическим поглотителем, имеющим слоевое сопротивление металла равное 70 Ом и расположенным между металлическими контактами к термочувствительному слою оксида ванадия, другой форматом 320x58 – без металлического поглотителя. На рисунке 2 приведена фотография фрагмента ММБП на границе указанных массивов микроболметров *L*-типа (характеризуемых большим расстоянием между контактами к термочувствительному слою, расположенными под прямым углом к ножкам микроболметра).

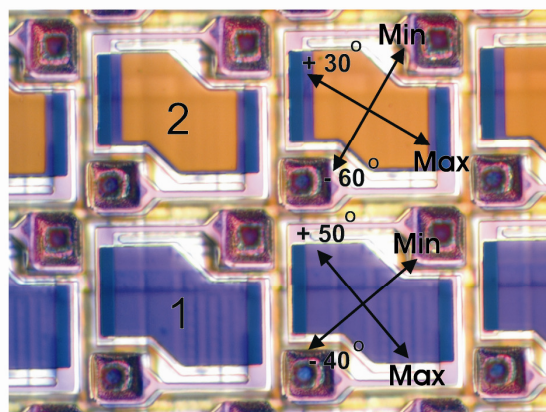


Рис. 2. Фрагмент матричного микроболومترического приемника, содержащий массивы микроболметров L-типа с металлическим поглотителем (2) и без него (1)

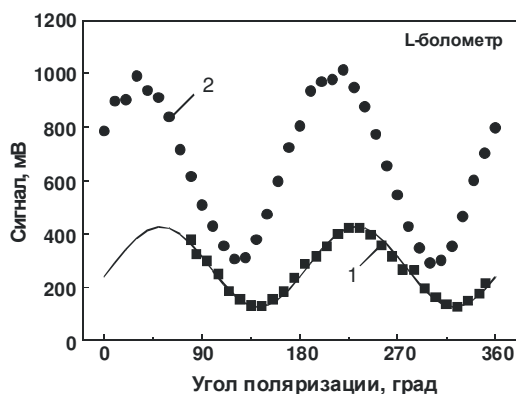


Рис. 3. Зависимости чувствительности микроболметров L-типа с металлическим поглотителем (2) и без него (1) от угла поляризации излучения

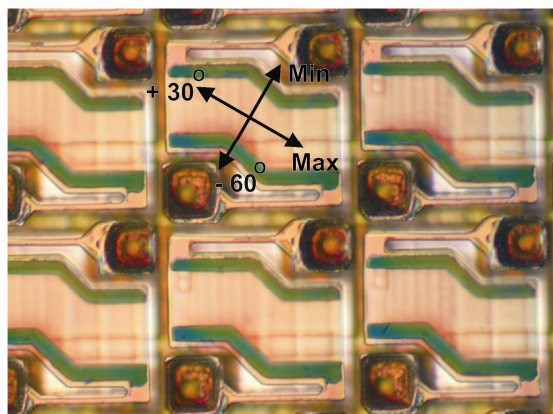


Рис. 4. Фрагмент матричного микроболومترического приемника, содержащего микроболметры S-типа без тонкого металлического поглотителя

Поляризационная зависимость чувствительности микроболметров

Для измерения относительной чувствительности ММБП в терагерцовом диапазоне использовали излучение Новосибирского лазера на свободных электронах, которое одновременно освещало рядом расположенные микроболметры с металлическим поглотителем и без него, что позволяло надежно сравнить чувствительности указанных двух типов болометров. Вращая ММБП относительно плоскости поляризации излучения, были получены угловые зависимости чувствительности микроболметров, которые представлены на рис. 3. Угол поляризации излучения отсчитывался по часовой стрелки относительно горизонтальной оси рис. 2 и 4. Видно, что чувствительность микроболметров с дополнительным металлическим поглотителем превышает значение чувствительности микроболметров без металлического поглотителя от 1,6 до 4 раз в зависимости от угла поляризации излучения.

Другой изготовленный нами тип микроболметров (S-тип, показанный на рисунке 4, у которого ножки «параллельны» контактам к термочувствительному слою и расстояние между контактами мало) имеет более выраженную зависимость чувствительности от угла поляризации излучения (рис. 5). Минимальная чувствительность наблюдается при направлении электрического поля поперек узких металлических полосок, выполняющих роль контактов к термочувствительному слою (см. рис. 4), и составляет примерно 2% от максимальной чувствительности. Это указывает, во-первых, на то, что поглощение терагерцового излучения происходит в узких металлических полосках (в шинах, идущих по ножкам микроболметров, и в полосках, выполняющих роль омического контакта к термочувствительному слою), работающих как микро-антенны, в которых выделяется джоулево тепло; и, во-вторых, на практически полное отсутствие поглощения в «теле» микроболметра, состоящего из слоев нитрида кремния и оксида ванадия, что согласуется с результатами, полученными при измерении спектров пропускания этих материалов (см. [8] и рис. 1).

Качественное объяснение зависимости чувствительности от угла поляризации излучения для микроболлометров *L*-типа может быть сделано в электростатическом приближении, применимость которого может быть оправдана малым размером микроболлометров (период матрицы приемников равен 51 мкм) по сравнению с длиной волны используемого терагерцового излучения (130 мкм). При этом квадраты размером 14x14 мкм, выполненные из хорошо проводящего толстого алюминия, расположенные по углам микроболлометров (см. рис. 2) и служащие контактами к находящейся в подложке схеме считывания сигналов, будут играть роль «металлических включений в диэлектрической среде» и, следовательно, электрическое поле будет концентрироваться между ближайшими квадратами. Тогда в случае электрического поля падающего излучения, направленного по направлению минимума чувствительности (см. рис. 2), на поверхности приемника оно будет сконцентрировано между вышеуказанными металлическими полосками (микро-антеннами), и не сможет вызвать в них значительного выделения джоулевого тепла, а, следовательно, и сигнала. В случае поля, направленного по направлению максимума чувствительности, оно будет «обходить» тело боллометра и концентрироваться вдоль этих металлических полосок, вызывая в них большое выделение джоулевого тепла и, следовательно, большую чувствительность микроболлометров. Добавление металлического поглотителя, вытянутой в горизонтальном направлении формы, будет в соответствии с экспериментом слегка поворачивать направление максимума чувствительности к горизонтальной оси.

В заключении отметим, что установленный в работе микроантенный механизм чувствительности микроболлометров к терагерцовому излучению требует проведения тщательного теоретического анализа, который позволит корректно проводить оптимизацию конструктивных параметров микроболлометров с целью повышения их чувствительности, а обнаруженная сильная зависимость чувствительности от поляризации излучения позволит правильно интерпретировать эксперименты, проводимые с поляризованным терагерцовым излучением.

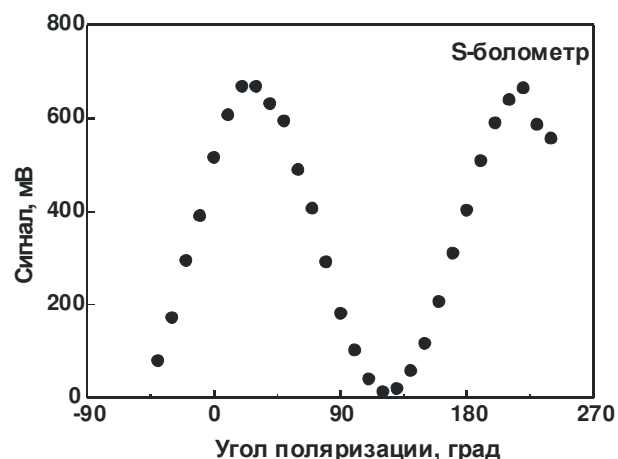


Рис. 5. Зависимость чувствительности микроболлометров *S*-типа без тонкого металлического поглотителя от угла поляризации излучения

Список литературы

1. Luukanen A., Pekola J. P. A superconducting antenna-coupled hot-spot microbolometer // *Appl. Phys. Lett.* 2003. Vol. 82. 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. Vol. 69. P. 1801–1803.
3. Williams B.S., Kumar S., Hu Q. et al. High-power terahertz quantum-cascade lasers // *Electron. Lett.* 2006. Vol. 42. N. 2. P. 89–91.
4. Bolotin V. P., Vinokurov N. A., Kayran D. A. et al. Status of the Novosibirsk terahertz FEL // *Nuclear Instr. and Methods in Phys. Res.* 2005. Vol. A543. P. 81–85.
5. Vinokurov N. A., Demytyev E. N., Dovzhenko B. A. et al. Novosibirsk Free Electron Laser Facility: Two-Orbit ERL with Two Fels // *Proceedings of IPAC'10, Kyoto, Japan WEOARA03, 2010. P.2427-2429.* <http://accel-conf.web.cern.ch/AccelConf/IPAC10/papers/weoara03.pdf>.
6. Lee A.W.M., Qin Q., Kumar S. et al. Real-time terahertz imaging over a standoff distance (>25 meters) // *Appl. Phys. Lett.* 2006. Vol. 89. 141125.
7. Dem'yanenko M. A., Esaev D. G., Knyazev B. A. et al. Imaging with a 90 frames/s microbolometer focal plane array and high-power terahertz free electron laser // *Appl. Phys. Lett.* 2008. Vol. 92. 131116.

8. Демьяненко М. А., Есаев Д. Г., Овсяк В. Н и др. Матричные микроболометрические приемники для инфракрасного и терагерцового диапазонов // Оптический журнал. 2009. Т. 76, вып. 12, С. 5-11.

9. Овсяк В.Н., Шашкин В.В., Демьяненко М. А. и др. Неохлаждаемые матричные

микроболометрические приемники ИК излучения на основе золь-гель VO_x // Прикладная физика. 2005. вып. 6. С.114–117.

25.09.2010