

05.4; 06.3

СВЕРХПРОВОДНИКОВЫЙ ОПТОЭЛЕКТРОННЫЙ
ПРИЕМНИК ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

О.С. Е с и к о в, Е.А. П р о т а с о в

В настоящей работе рассмотрены принцип построения и характеристики сверхпроводникового приемника нового типа – определялся ронного. Важнейшими преимуществами такого приемника являются отсутствие транспортного тока, пропускаемого через чувствительный элемент (ЧЭ), и, как следствие этого, отсутствие необходимости в электрических контактах.

Указанные преимущества сверхпроводникового оптоэлектронного приемника по сравнению с известными „резистивными“ могут оказаться решающими при создании устройств регистрации теплового излучения от движущихся и широкоформатных объектов.

Физическая суть работы оптоэлектронного приемника заключается в изменении диамагнитных свойств сверхпроводниковой пленки при изменении ее температуры из-за теплового воздействия излучения, а регистрация диамагнитного состояния осуществляется по величине пропускаемого сверхпроводниковой пленкой магнитного потока с помощью магнитооптического преобразователя (МОП). Проникающий магнитный поток благодаря эффекту Фарадея приводит к поляризационной модуляции вспомогательного считывающего излучения видимого диапазона.

Как известно, идеальный диамагнетизм является одним из фундаментальных свойств сверхпроводящего состояния. Иначе говоря, сверхпроводник обладает магнитной восприимчивостью

$$\chi = M/H = -1, \quad (1)$$

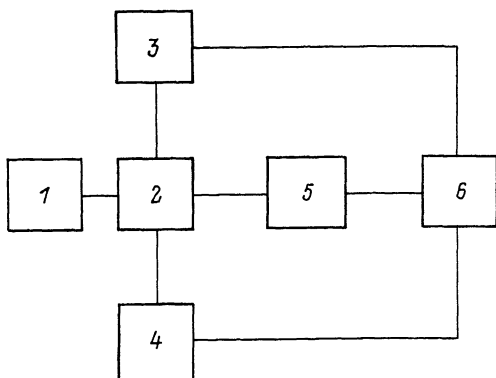
т.е. магнитное поле полностью выталкивается из объема образца. При полях, меньших первого критического H_{c1} , проникновения магнитного поля в сверхпроводник не происходит. Когда же поле превышает значение H_{c1} , происходит частичное проникновение потока.

Указанное обстоятельство накладывает ограничение на величину „рабочего“ магнитного поля H :

$$H < H_{c1}. \quad (2)$$

Однако даже при выполнении условия (2) напряженность магнитного поля отлична от нуля в некотором поверхностном слое сверхпроводника, определяемом глубиной проникновения поля λ , что дает ограничение на толщину t сверхпроводниковой пленки

$$t > \lambda. \quad (3)$$



1 – сверхпроводниковая пленка, 2 – магнитооптический преобразователь, 3 – источник оптического излучения, 4 – фотоприемник, 5 – источник магнитного поля, 6 – источник питания.

Проведенный анализ показал, что для использования в качестве ЧЭ при работе в области азотных температур наиболее подходящей является пленка ВТСП на основе системы $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$, которая обладает удовлетворительными параметрами. Так, глубина проникновения составляет 0,1–0,15 мкм, а $H_{c1} > 100$ Э. Условия (2) и (3) выполняются при толщине пленки $t \sim 1$ мкм в магнитном поле $H < 100$ Э.

Наконец, для эффективной работы приемно-передающего модуля в целом необходимо выполнить согласование теплофизических, магнитных и оптических свойств чувствительного элемента и магнитооптического преобразователя.

Оценку чувствительности оптоэлектронного приемника можно сделать следующим образом:

$$y_{max} = G^{-1}H(dx/dT). \quad (4)$$

Здесь G – интегральная теплопроводность между ЧЭ и термостатом, которая связана с тепловой постоянной τ ; $G = c/\tau$ (c – полная теплоемкость системы). При $\tau = 1$ с вполне достижимой величиной G является $G = 10^{-6}$ Вт/К. Если $H = 100$ Э, а $dx/dT \sim 1$, то получим $y_{max} \sim 10^8$ Гс/Вт.

Пороговая чувствительность МОП определяется порогом реагирования оптической схемы, который ограничен шумами как приемника, так и источника излучения. При использовании ОМП Фарадея с двумя поляризаторами интенсивность регистрируемого излучения зависит от свойств материала МОП (коэффициента поглощения β , толщины материала пленки d , удельного фарадеевского F , намагниченности насыщения I_s , величины магнитной восприимчивости χ_M), от геометрии оптической схемы измерения (углов между плоскостью падения света и направлениями пропускания поляризатора α и анализатора θ), а также от напряженности внешнего магнитного поля H .

В случае, когда падающее излучение поляризовано перпендикулярно плоскости падения ($\alpha = \frac{\pi}{2}$) и угол поворота плоскости поляризации за счет эффекта Фарадея мал

$$\varphi_F = FdH \frac{\chi_M}{4\pi J_S} \ll 1, \quad (5)$$

выражение для интенсивности регистрируемого излучения записывается следующим образом [1]:

$$I = I_0 A^2 \exp(-\beta d) [\sin^2 \theta + K - FdH - FdH \frac{\chi_M}{4\pi J_S} \sin 2\theta + (FdH \frac{\chi_M}{4\pi J_S})^2 \cos^2 \theta], \quad (6)$$

где I_0 - интенсивность падающего излучения, K - коэффициент качества поляризатора, A - амплитудный коэффициент пропускания.

Минимальное значение регистрируемого угла поворота плоскости поляризации может быть определено из отношения полезного сигнала к шуму (С/Ш) в фотоприемном устройстве.

Все виды шумов, возникающих в приемниках оптического диапазона, и способы их подавления в настоящее время достаточно хорошо изучены. Для подавления шумовых флуктуаций, возникающих за счет непостоянства интенсивности излучения, используются различные схемы компенсации. Для снижения шума мерцания в фотоэмиссионных приемниках применяют схемы модуляции магнитооптического сигнала. Для снижения тепловых шумов снижают рабочую температуру. К уменьшению дробовых шумов приводит повышение интенсивности оптического излучения. При оптимизации поляриметрической схемы с использованием всех вышеперечисленных методов может быть достигнута чувствительность по углу поворота плоскости поляризации $\varphi_{F, \min} = 10^{-7}$ рад. [2] в полосе 1 Гц.

Минимальная величина регистрируемого магнитного поля определяется из выражения (5)

$$H_{\min} = \varphi_{F, \min} \frac{4\pi J_S}{F(d)\chi_M}. \quad (7)$$

Для существующих в настоящее время висмутсодержащих пленок ферриграната наиболее характерные значения параметров ($4\pi J_S \approx 300$ Гс, $\chi_M \approx 500$, $Fd \approx 1$ рад) позволяют регистрировать магнитные поля напряженностью $\sim 6 \cdot 10^{-8}$ Э, следовательно, пороговая чувствительность оптоэлектронного приемника может достигать $\sim 6 \cdot 10^{-16}$ Вт/Гц^{1/2}, что значительно меньше, чем термодинамические флуктуации температуры при 77 К, которые составляют $\sim 10^{-14}$ Вт/Гц^{1/2} [3].

Нами разработана схема (см. рисунок) и реализован макет оптоэлектронного приемника. Было обеспечено необходимое соответствие между полем экранирования пленки ВТСП и полем перемagnичивания МО пленки.

Приемно-передающий модуль состоит из ЧЭ, выполненного на основе сверхпроводниковой пленки системы $YBa_2Cu_3O_{7-x}$, и МО пленки висмутсодержащего граната, которые помещены в переменное магнитное поле, перпендикулярное плоскости пленки. Модуль распо-

пагается в специально сконструированном азотном криостате. Необходимо заметить, что выбор той или иной конструкции приемного устройства для конкретных целей является довольно сложной задачей. В созданном макете такая конкретная задача не ставилась, однако данную конструкцию можно отнести к классу болометров на твердой подложке.

Считывающее устройство состоит из обычной лампы накаливания, свет от которой проходит через входной поляризатор и направляется на магнитооптический преобразователь, а отраженное излучение поступает через выходной поляризатор на фотоприемник ФД-24К. Сигнал с фотоприемника усиливается и регистрируется узкополосным резонансным усилителем В6-9.

Сверхпроводниковая пленка была получена с помощью импульсного лазерного напыления по методике, развитой в работе [4], и имела следующие параметры: критическую температуру $T_{c, R=0} = 90$ К, ширину индуктивного перехода 1.5 К, критический ток при 77 К $\sim 10^6$ А/см². Толщина пленки t около 1 мкм. Размер ЧЭ 6×6 мм. Для устранения эффектов деградации на пленку наносился тонкий слой серебра с последующей специальной термообработкой. Подложкой служил монокристаллический $SrTiO_3$ толщиной 0.3 мм.

Измерения уровня выходного сигнала от интенсивности видимого и инфракрасного излучения ($\lambda = 5.3$ мкм) показали, что в данной конструкции регистрируется тепловой поток мощностью 10^{-8} – 10^{-9} Вт, причем чувствительность ограничена флуктуациями фотоприемника, которые в свою очередь определялись нестабильностью электрических цепей устройства считывания.

Максимальное значение падающей мощности, при которой происходило насыщение сигнала (сверхпроводимость в пленке полностью разрушалась), составляло 1 мВт, что соответствует динамическому диапазону 50 – 60 дБ.

В заключение отметим, что создание сверхпроводниковой оптоэлектронной системы может служить основой при конструировании оптических управляемых транспарантов, а также может быть использовано для исследования диамагнитного состояния сверхпроводников.

Авторы благодарят А.А. Иванова за изготовление сверхпроводниковой пленки с требуемыми параметрами.

С п и с о к л и т е р а т у р ы

- [1] Е с и к о в О.С., Л е б е д е в С.В. // ОМП. 1988. № 9. С. 10.
- [2] Б а л б а ш е в А.М., Ч е р в о н е н к и с А.Д. Магнитные материалы для микроэлектроники. М.: Энергия, 1979.
- [3] С l a r k e J. et al. // J. Appl. Phys. 1977. V.48. P. 4865.
- [4] З а й ц е в - З о т о в С.В., М а р т ы н ю к А.Н., П р о т с о в Е.А. // ФТТ. 1983. Т. 25. В. 1. С. 184.