

УДК 621.394.62 : 621.3.029.65

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ОТКРЫТОГО РЕЗОНАТОРА ДЛЯ СОЗДАНИЯ УЗКОПОЛОСНОГО ПЕРЕСТРАИВАЕМОГО ПРИЕМНИКА МИЛЛИМЕТРОВЫХ И СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ВОЛН

А. Н. Выставкин, В. Н. Губанков

Рассмотрена возможность создания узкополосного перестраиваемого приемного устройства миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов радиоволн на основе открытого резонатора с помещенным в него объемным детектором. Конкретное рассмотрение проведено с детектором из n -In Sb, охлажденным до гелиевых температур. Исследованы вопросы выбора типа и формы резонатора и размещения в нем детектора с целью получения максимальной чувствительности при полосе $\sim 10^{-2} \div 10^{-3}$. В двухмиллиметровом диапазоне волн проведено экспериментальное исследование характеристик открытого резонатора с помещенным в него детектором из n -In Sb при охлаждении всей системы до гелиевых температур. Достигнута добротность такой системы ~ 700 . Обсуждаются пути оптимизации подобной системы с целью получения наилучшей предельной чувствительности приемного устройства при заданной добротности резонатора с детектором.

1. В настоящее время имеется несколько типов широкополосных приемников миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн с различными принципами детектирования (оптико-акустический приемник [1], германиевый болометр [2] и др.). Среди них приемник, в котором в качестве детектора используется n -In Sb, охлажденный до гелиевых температур [3], является одним из наиболее перспективных, поскольку он обладает высокой чувствительностью и высоким быстродействием одновременно. Принцип детектирования СВЧ излучения в n -In Sb в отсутствие магнитного поля сводится к повышению электронной температуры и последующему изменению проводимости детектора [4, 5]. Во всех перечисленных типах приемников механизм детектирования нерезонансный, что обуславливает широкую полосу принимаемых частот.

Одним из вопросов, возникающих в связи с разработкой приемных устройств коротковолновой части миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов, является создание высокочувствительной узкополосной перестраиваемой приемной системы. Сужение полосы принимаемых частот можно получить при использовании резонансных эффектов поглощения излучения, связанных с механизмом взаимодействия излучения с объемом твердотельного детектора (например, поглощение в условиях циклотронного резонанса [6]).

Другая возможность сужения полосы при приеме излучения заключается в использовании открытого резонатора в качестве колебательной системы, обеспечивающей селективность и перестройку по частоте. Объемные резонаторы в указанном диапазоне длин волн неприменимы из-за малых размеров и больших тепловых потерь либо малого разрежения спектра собственных колебаний при увеличении размеров резонатора.

Система с открытым резонатором в качестве фильтра на входе широкополосного приемника уже рассматривалась [7]. В такой системе открытый резонатор не влияет на предельную чувствительность детектора, поскольку он практически не изменяет условий согласования детектора с потоком излучения. Если детектор поместить в резонатор, то кроме возможности сужения полосы принимаемых частот и перестройки по частоте возникает возможность улучшения согласования детектора с потоком принимаемого излучения [4]. В этой связи интересно оценить, какими характеристиками обладает открытый резонатор с помещенным в него широкополосным детектором.

Рассмотрение возможности создания узкополосной приемной системы с использованием открытого резонатора охватывает обширный круг вопросов, среди которых прежде всего надо остановиться на выборе типа открытого резонатора, способа помещения в него детектора и возбуждения, а также оценить предельные возможности такой системы. Обсуждение этих вопросов и является целью данной работы.

2. Открытый резонатор может быть выполнен с плоскими, с вогнутыми или с одним плоским и одним вогнутым зеркалами. В открытых резонаторах с плоскими зеркалами на колебательные процессы существенно влияет дифракция, возникающая на краях зеркал, тем больше, чем меньше их поперечные размеры. Теория открытых резонаторов развита в работах [8-10].

Основными критериями при выборе типа и формы резонатора для приемной системы и способа размещения в нем детектора являются максимально возможная предельная чувствительность и достаточно узкая ширина полосы ($\sim 10^{-2} \div 10^{-3}$) приемника.

Предельная чувствительность детектора $P_{\text{пр}}$ в расчете на единичную полосу усилителя протектированного сигнала определяется соотношением [11]

$$P_{\text{пр}} = \frac{\sqrt{V}}{\eta(\omega)} \frac{\sqrt{t 4 k T \rho}}{k_d} = \frac{\sqrt{V}}{\eta(\omega)} p_{\text{пр}} \quad (1)$$

Здесь V — объем детектора, $\eta(\omega)$ — доля поглощенной детектором мощности на частоте излучения ω , k — постоянная Больцмана, T — температура детектора, ρ — его удельное сопротивление, t — шумовое отношение детектора, приведенное к его тепловым шумам. Удельные коэффициент преобразования k_d и чувствительность $p_{\text{пр}} = \sqrt{t 4 k T \rho} / k_d$ не зависят от геометрии детектора и условий согласования с приемным трактом и определяются только параметрами материала [11] (если шумовое отношение t не зависит от геометрии детектора, что практически всегда выполняется).

Из (1) можно видеть, что предельная чувствительность будет улучшаться при уменьшении объема детектора, если при этом будет выполняться условие $\eta(\omega) = 1$. Выполнение этого условия сложно обеспечить в любой системе СВЧ, в том числе и при помещении детектора в открытый резонатор, поскольку при очень малом объеме детектора (поперечные размеры меньше длины волны) практически невозможно осуществить полностью поглощение в нем излучения. Это связано с малым коэффициентом включения детектора в резонатор и наличием потерь. В данном случае, кроме упомянутых выше дифракционных потерь на краях зеркал и элементе связи и диссипативных потерь в зеркалах, будут оказывать существенное влияние дифракционные потери на самом детекторе (возмущение поля и переизлучение энергии в свободное пространство).

На основании простейших соображений с учетом сказанного представляется естественным использование резонатора с одним сферическим и одним плоским зеркалами и расположение детектора в минимальном сечении каустики, т. е. на плоском зеркале. Если при этом поперечные размеры детектора, помещенного на плоском зеркале резонатора, превышают диаметр каустики на зеркале, можно ожидать, что дополнительные дифракционные потери не будут существенно влиять на добротность нагруженного резонатора, а коэффициент включения детектора в резонатор будет достаточно большим при сравнительно малых размерах детектора. При использовании резонатора с плоскими зеркалами достичь малых дифракционных потерь на зеркалах и детекторе при малых размерах детектора невозможно.

Добротность нагруженного резонатора $Q_{\text{нагр}}$ определяется выражением

$$Q_{\text{нагр}} = \frac{\pi q}{\delta_d + \delta' + \delta_{\text{дет}}}, \quad (2)$$

где δ_d — дифракционные потери, δ' — потери из-за поглощения в зеркалах, рассеяния на элементе связи и т. д., $\delta_{\text{дет}}$ — «потери» за счет поглощения в детекторе, q — число полуволн между зеркалами резонатора с учетом детектора на основном типе колебаний $00q$. Величина $\delta_{\text{дет}}$ однозначно связана с коэффициентом отражения $r_{\text{дет}}$ от детектора, представляющего собой поглощающий диэлектрический слой, позади которого находится металлическая подложка, причем [17]

$$r_{\text{дет}} = -|r_{\text{дет}}| e^{-j\vartheta}. \quad (3)$$

При условии $4\pi\sigma_\omega/\omega\epsilon \ll 1$ (ϵ — диэлектрическая проницаемость σ_ω — проводимость материала детектора на частоте ω)

$$|r_{\text{дет}}| = \left[1 - \text{sh } \alpha \text{ sh } \varphi \left(\text{ch}^2 \frac{\varphi + \alpha}{2} - \sin^2 x \right)^{-1} \right]^{1/2}; \quad (4)$$

$$\vartheta = \text{arctg} \left(\text{th} \frac{\varphi - \alpha}{2} \text{tg } x \right) + \text{arctg} \left(\text{th} \frac{\varphi + \alpha}{2} \text{tg } x \right), \quad (5)$$

$\alpha = 4\pi\sigma_\omega d/c \sqrt{\epsilon}$ (d — толщина детектора);

$$\varphi = \ln \frac{\sqrt{\epsilon} + 1}{\sqrt{\epsilon} - 1}, \quad x = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon} d. \quad (6)$$

«Потери», вносимые детектором при условии $|r_{\text{дет}}| \ll 1$ и $\alpha \ll \varphi$,

$$\delta_{\text{дет}} = \text{sh } \alpha \text{ sh } \varphi \left[2 \left(\text{ch}^2 \frac{\varphi}{2} - \sin^2 x \right) \right]^{-1}. \quad (7)$$

При записи (2) подразумевается, что дифракционными потерями за счет внесения в резонатор детектора можно пренебречь.

Для обеспечения оптимального согласования резонатора с передающим трактом на резонансной частоте ($\eta_{\text{рез}} = 1$) и, следовательно, высокой чувствительности приемной системы необходимо выполнение условия

$$Q_{\text{св}} = Q_{\text{нагр}}. \quad (8)$$

Здесь $Q_{\text{св}} = 2\pi q \delta_{\text{св}}^{-1}$ — добротность связи, $\delta_{\text{св}}$ — «потери», обусловленные связью. При этом добротность нагруженного резонатора должна определяться в основном поглощением в детекторе

$$\delta_{\text{дет}} \gg \delta_d + \delta' \quad (9)$$

Из (7) видно, что $\delta_{\text{дет}}$ есть функция проводимости и толщины детектора; с увеличением σ_{ω} величина $\delta_{\text{дет}}$ возрастает, и доля поглощенной мощности максимальна, если $d = (2s + 1)\lambda/4 \sqrt{\epsilon}$ (s — целое число), и минимальна, если $d = s\lambda/2 \sqrt{\epsilon}$. Эти условия соответствуют минимальной и максимальной величинам $Q_{\text{дет}} = \pi q \delta_{\text{дет}}^{-1}$. Увеличение оптической толщины a приводит к сглаживанию интерференционных эффектов, т. е. к сближению максимального и минимального значений $Q_{\text{дет}}$. Кроме того, при увеличении σ_{ω} , таком, что условие $\alpha \ll \varphi$ перестает выполняться, соотношение (7) несправедливо; при дальнейшем увеличении проводимости неравенство $4\pi\sigma_{\omega}/\omega\epsilon \ll 1$ не имеет места, возрастает коэффициент отражения от детектора и уменьшаются омические потери, детектор все сильнее приобретает металлические свойства.

Минимальное значение площади приемной поверхности детектора в рассматриваемом случае получается, если $l \ll r_0$ и $l \sim r_0$ (l — расстояние между зеркалами, r_0 — радиус кривизны сферического зеркала), поскольку в этих условиях диаметр каустики на плоском зеркале мал [8]. При малых расстояниях между зеркалами собственная добротность резонатора невелика из-за тепловых потерь, и соотношение (9) трудно выполнить. По этой причине имеет смысл увеличить расстояние между зеркалами, одновременно увеличивая диаметр сферического зеркала так, чтобы он существенно превышал диаметр каустики. Если поперечные размеры плоского зеркала порядка размеров каустики основного типа колебаний $00q$, высшие типы колебаний не возбуждаются из-за больших дифракционных потерь. Однако при воздействии на систему спектра колебаний возможно возбуждение резонатора на нескольких длинах волн, различающихся друг от друга на величину

$$\Delta\lambda = 2l/q(q + 1), \quad (10)$$

причем $\Delta\lambda$ уменьшается с увеличением расстояния между зеркалами. При работе с широкополосным источником излучения это обстоятельство будет нежелательным и от него необходимо избавиться, применяя фильтры, связанные открытые резонаторы и т. п. С этой же целью можно использовать режим работы, аналогичный режиму работы фурье-спектрометра [18].

3. Целью экспериментальных исследований являлось изучение поведения открытого резонатора с помещенным в него широкополосным детектором из n -InSb при гелиевых температурах. При проведении эксперимента использовался резонатор с круглыми сферическим и плоским медными полированными зеркалами. Радиус кривизны сферического зеркала был равен 50 мм, диаметр — 28 мм. Исследования проводились в 2-миллиметровом диапазоне. СВЧ мощность передавалась к резонатору с помощью последовательно соединенных диэлектрического и металлического волноводов. Связь резонатора с металлическим волноводом осуществлялась через щель размерами $0,1 \times 1,8$ мм² в центре сферического зеркала. Собственная добротность и добротность нагруженного резонатора рассчитывались из измеренных зависимостей коэффициента отражения от частоты или механической перестройки. Схема установки, методика измерений и расчетов описаны в [13].

На рис. 1 представлены зависимости собственной добротности колебаний типа $00q$ резонатора, охлажденного до гелиевых температур, от числа q . Оценки [13, 14] показывают, что при $l < r_0/2$ собственная добротность использованного нами резонатора определяется в основном

дифракционными потерями на щели, которую можно рассматривать как неоднородность на сферическом зеркале. Тепловые потери в данном случае несущественны; дифракционные потери за счет рассеяния на

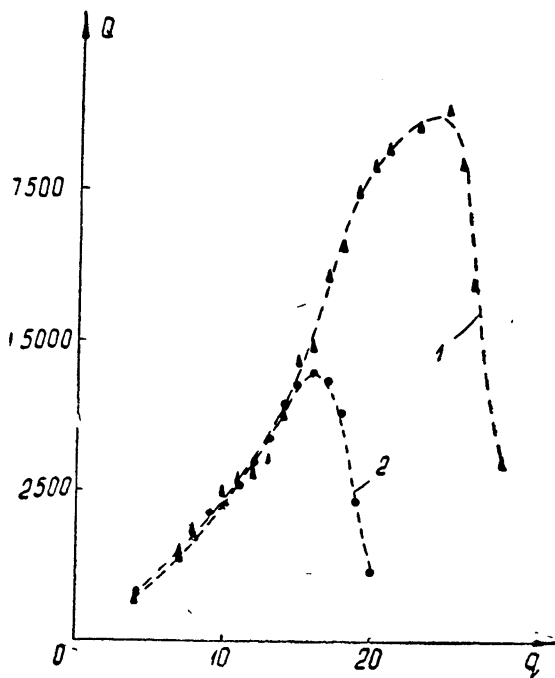


Рис. 1. Собственная добротность основных типов колебаний $00q$ резонатора:

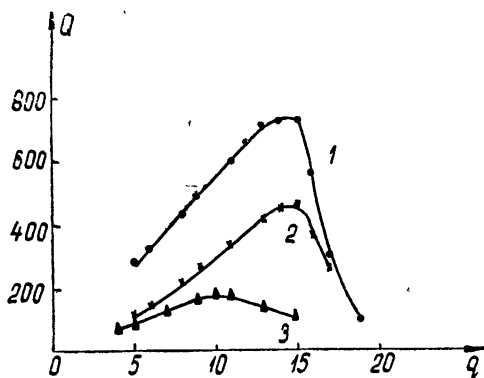
1—плоское зеркало с $R=14$ мм; 2—плоское зеркало с $R=7,5$ мм.

краях зеркал начинают преобладать тогда, когда $l \gg r_0/2$. При этом радиус сферического зеркала примерно вдвое превышает радиус каустики, что согласуется с экспериментальными результатами, полученными в работе [15].

Добротность нагруженного резонатора в сильной степени зависит от параметров материала и размеров помещенного в него детектора. На рис. 2 изображены экспериментально полученные зависимости добротности колебаний $00q$ резонатора от числа q при помещении в него различных детекторов. Видно, что дифракционные потери при внесении в резонатор детекторов увеличиваются и начинают сказываться при меньших расстояниях между зеркалами по сравнению с ненагруженным резонатором. Например, максимальное значение $Q_{\text{нагр}}$ при использовании детекторов № 2—13 (поперечные размеры $12,5 \times 12,5$ мм²) и № 4—13 (поперечные размеры 14×14 мм²) соответствует $l \approx 13$ мм. Для детектора № 1—13 ($2,5 \times 2,5$ мм²) $l_{\text{opt}} = 9$ мм. Этого результата и следовало ожидать, поскольку внесение детектора с меньшими поперечными размерами вызывает более сильное возмущение поперечной структуры поля в резонаторе.

Рис. 2. Добротности основных типов колебаний $00q$ нагруженного резонатора:

1—детектор № 2—13 ($12,5 \times 12,5 \times 0,5$ мм³; $\sigma = 0,018$ (ом·см)⁻¹); 2—детектор № 4—13 ($14 \times 14 \times 0,53$ мм³; $\sigma = 0,06$ (ом·см)⁻¹); 3—детектор № 1—13 ($2,5 \times 2,5 \times 0,5$ мм³; $\sigma = 0,015$ (ом·см)⁻¹).



Это предположение подтверждается результатами экспериментов с открытым резонатором без детектора, плоское зеркало которого имеет радиус 7,5 мм (см. рис. 1). Из совпадения кривых 1 и 2 на рис. 1 при

$l < 15$ мм можно заключить, что при использовании детекторов № 2—13 и № 4—13 дифракционные потери из-за внесения детектора не увеличиваются существенно и добротность нагруженного резонатора определяется поглощением излучения в детекторе. Удовлетворительное совпадение экспериментально полученных значений $Q_{\text{дет}}$ при $l < 15$ мм (детекторов № 2—13 и № 4—13) и оценок из (7) подтверждает этот вывод. В свою очередь, малое значение $Q_{\text{нагр}}$ при внесении в резонатор детектора с поперечными размерами, меньшими размеров каустики, и расхождение вычисленной из (7) и измеренной добротности детектора № 1—13 позволяют сделать заключение о том, что в этом случае дифракционные потери за счет внесения детектора остаются преобладающими практически во всем диапазоне изменения расстояния между зеркалами.

Следовательно, для выполнения условий, обеспечивающих максимальное поглощение СВЧ излучения детектором, необходимо, чтобы его поперечные размеры по крайней мере вдвое превышали размеры каустики на плоском зеркале.

Как видно из рис. 2, добротность нагруженного резонатора в сильной степени зависит от проводимости материала детектора. Используя детекторы с различной проводимостью материала, можно изменять значения добротности и, следовательно, предельной чувствительности системы в широких пределах (предполагается, что условие (9) при этом всегда выполняется).

В проведенных экспериментальных исследованиях не ставилась задача оптимального согласования открытого резонатора с передающим трактом. В нашем случае $\delta_{\text{св}} \simeq \delta_{\text{ш}}$, причем $\delta_{\text{ш}}/2 > \delta_{\text{т}} + \delta_{\text{д}}$ и дифракционные потери на щели определяют собственную добротность резонатора.

Проводились также измерения зависимости продетектированного сигнала от расстояния между зеркалами. При этом получились резонансные кривые, ширина которых соответствовала величине измеренной добротности резонатора с детектором.

Таким образом, проведенные оценки и полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о принципиальной возможности создания узкополосного перестраиваемого приемного устройства с высокой чувствительностью на основе открытого резонатора с помещенным в него широкополосным объемным детектором.

4. Наряду с оптимальным включением детектора в открытый резонатор важной задачей является осуществление оптимального согласования нагруженного резонатора с передающим трактом. В качестве передающего тракта в субмиллиметровом диапазоне наиболее целесообразно использовать квазиоптическую линию, поскольку хорошо известно, что волноводы неприемлемы в этом диапазоне из-за больших потерь. В этой связи целесообразно использовать квазиоптический способ возбуждения резонатора. Оценки показывают, что использование в качестве элемента связи части поверхности сферического зеркала открытого резонатора, выполненной в виде металлической сетки, является, по-видимому, наиболее приемлемым решением. Использование сетки позволяет существенно уменьшить дифракционные потери на элементе связи и, следовательно, повысить собственную добротность резонатора, так что при этом можно добиться одновременного выполнения условий (8) и (9) при достаточно высокой нагруженной добротности резонатора. Кроме того, квазиоптический метод возбуждения дает возможность повысить отношение сигнала при резонансе к сигналу, обусловленному излучением в свободное пространство за счет дифракции на элементе связи в отсутствие резонанса. Заметим, что в использован-

ном нами резонаторе из-за дифракции на элементе связи сигнал, снимаемый с помещенного в резонатор детектора, в отсутствие резонанса был всего в 7—10 раз меньше, чем при возбуждении резонатора.

В качестве передающего тракта можно использовать линзовую линию (например, линию Губо [16]). Между передающим трактом и резонатором должно быть помещено согласующее устройство, обеспечивающее формирование фазового фронта волны по форме сферического зеркала, поскольку радиус сферического зеркала и параметры резонатора и детектора выбираются исходя из условия оптимального включения детектора в резонатор. При выборе согласующего устройства следует учитывать, что условия возбуждения колебания $00q$ открытого резонатора существенно ухудшаются, если разность фаз на краях полупрозрачной части зеркала $\sim \pi$. Этим условием определяется также диаграмма направленности приемной системы.

Оценим предельную чувствительность рассматриваемой приемной системы с детектором из n -In Sb на длине волны $\lambda \approx 1$ мм при постоянной времени после синхронного детектора $\tau = 1$ сек. Для описанного типа открытого резонатора при $l = 20$ мм радиус каустики на плоском зеркале равен 2,8 мм, так что поперечные размеры детектора должны быть ~ 11 мм. Если проводимость материала детектора $\sim 0,1$ (ом·см) $^{-1}$, его удельная предельная чувствительность $P_{пр} \approx 3 \cdot 10^{-12}$ вт·см $^{-1}$ (компенсация примесей составляет 95%) [11]. Для обеспечения максимального коэффициента включения детектора в резонатор при минимальном его объеме толщина детектора d должна быть порядка четверти длины волны ($\lambda/4\sqrt{\epsilon} = 60$ мк). При этом для $\sigma_{\omega} \approx \sigma \approx 0,1$ (ом·см) $^{-1}$ $Q_{дет} \approx 500$ и $P_{пр} = 2,3 \cdot 10^{-13}$ вт при $\tau = 1$ сек. Легко видеть, что предельная чувствительность улучшится, если использовать более высокоомные детекторы (если $\sigma \approx 0,03$ (ом·см) $^{-1}$, $P_{пр} \approx 1,4 \cdot 10^{-13}$ вт). Чувствительность описанной системы будет улучшаться при уменьшении длины волны за счет уменьшения размеров всей системы, в том числе и детектора (при соблюдении оптимальных условий возбуждения резонатора). Напомним, что чувствительность оптимального детектора с размерами приемной площадки 1 см 2 в отсутствие резонанса составляет $\sim 2 \cdot 10^{-12}$ вт [12].

Авторы глубоко признательны В. В. Мигулину за внимание к работе и ценные советы, Ю. Н. Казанцеву — за полезную дискуссию, А. А. Краснову и Н. Б. Павлову — за помощь в проведении измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Панкратов, Опт.-мех пром., № 2, 16 (1957).
2. F. J. Low, Proc. IEEE, 53, 516 (1965).
3. К. А. Аганбекян, А. Н. Выставкин, В. Н. Листвин, В. Д. Штыков. Радиотехника и электроника, 11, 1252 (1966).
4. M. A. Kinch, B. Y. Rollin, Brit. JAP, 14, 672 (1963).
5. Ш. М. Коган, ФТТ, 4, 1891 (1962).
6. D. W. Goodwin, R. H. Jones, JAP, 32, 2065 (1961);
Е. М. Гершензон, Ю. А. Гурвич, Н. Г. Птицына, С. Л. Орлова, ФТТ, 9, 691 (1967).
7. Н. А. Горохов, Г. Г. Долгов-Савельев, ПТЭ, № 1, 126 (1966).
8. Л. А. Вайнштейн, ЖЭТФ, 44, 1050 (1963).
9. A. G. Fox, T. Li, Bell System Techn. J., 40, 453 (1961).
10. Л. А. Вайнштейн, ЖЭТФ, 45, 684 (1963).
11. А. Н. Выставкин, В. Н. Губанков, В. Н. Листвин, В. В. Мигулин, Физ. тех. полупр., 1, 844 (1967).
12. А. Н. Выставкин, В. Н. Губанков, В. Н. Листвин, В. В. Мигулин. Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, 11, № 4, 602 (1968).
13. А. Н. Выставки, В. Н. Губанков, Ю. Н. Казанцев, Н. Б. Павлов, ПТЭ, № 1, 138 (1968).

- 14 Ю. Н. Казанцев, Изв. высш. уч. зав.—Радиофизика, 10, № 4, 518 (1967)
- 15 Г. Д. Богомолов, сб. Электроника больших мощностей, № 3, 154 (1964).
- 16 G. A. Goubau, F. Schwing, IRE Trans., AP-9, 248 (1961).
- 17 Дж. А. Стрэттон, Теория электромагнетизма, гл. IX, ГИТТЛ, М., 1948.
- 18 P. L. Richards, J. Opt. Soc. Am., 54, 1474 (1964).

Институт радиотехники и электроники
АН СССР

Поступила в редакцию
9 марта 1967 г.

APPLICABILITY OF AN OPEN RESONATOR FOR CONSTRUCTING A NARROW-BAND RETUNED RECEIVER IN MILLIMETER AND SUBMILLIMETER RANGES

A. N. Vystavkin, V. N. Gubankov

The possibility of constructing a narrow-band retuned receiver in millimeter and submillimeter ranges on the basis of an open resonator with a volume detector placed in it is considered. The case is detailly examined for n -InSb detector cooled up to helium temperatures. The choice of type and form of the resonator and placing the detector in it is discussed in order to obtain the maximum sensitivity at the frequency band $\sim 10^{-2} - 10^{-3}$. The experimental investigation of the characteristics of open resonator with n -InSb detector placed in it when the whole system is cooled up to the helium temperature is made in 2 mm wave band. The quality factor of such a system of about 700 is achieved. The way of optimization of the similar system is discussed for the purpose of getting the best limiting sensitivity of the receiver at the given Q -factor of the resonator with detector.
