

УДК 621.391.22 : 621.378.325

ВЫСОКОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ПРИЕМНИК СУБМИЛЛИМЕТРОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ n -GaAs

*В. М. Афиногенов, С. А. Айтхожин, В. А. Страхов, А. А. Телегин,
В. И. Трифонов*

На основе эпитаксиальных пленок из n -GaAs, выращенных из паровой фазы методом газотранспортных реакций, разработан приемник субмиллиметрового диапазона волн. Указанный приемник имеет спектральную характеристику с максимумом на длине волны $\lambda = 0,286$ мм, где вольт-ваттная чувствительность составляет $4 \cdot 10^4$ в/вт, а предельная чувствительность не хуже 10^{-12} вт/гц^{1/2}. В режиме радиометра была зафиксирована чувствительность к изменению температуры черного тела не хуже чем $0,006^\circ\text{K}$ при постоянной времени $\tau = 1$ сек. Диаграмма направленности приемника 13° , входной диаметр световода 10 мм.

1. Одной из задач проблемы освоения субмиллиметрового диапазона является разработка новых типов приемных устройств. Из существующих в настоящее время высокочувствительных приемников субмиллиметрового и коротковолновой части миллиметрового диапазонов волн, по-видимому, наиболее исследованными и получившими применение в ряде областей физики являются приемники на основе n -InSb [1, 2] и Ge [3, 4]. Не умаляя достоинств этих приемников, следует отметить те их недостатки, которые служат ограничением для дальнейших применений: а) значительное снижение чувствительности в приемниках на основе n -InSb в диапазоне $0,15 \div 0,4$ мм и б) довольно большая инерционность болометрических приемников из Ge ($\sim 10^{-4}$ сек), что мешает использовать эти приемники для регистрации более быстрых процессов.

В настоящее время существует потребность в приемных устройствах коротковолновой части субмиллиметрового диапазона с минимальной инерционностью.

В этом плане для создания приемников субмиллиметрового диапазона может быть весьма перспективным использование чистого арсенида галлия с электронной проводимостью. Как известно [5], в эпитаксиальных пленках n -GaAs высокой степени чистоты наблюдается сильный фототермический эффект с мелких донорных уровней глубиной $\epsilon_d \approx 5,8 \cdot 10^{-3}$ эв, в результате которого электроны с основного состояния $1s$ при поглощении кванта $h\nu < \epsilon_d$ переходят в одно из возбужденных состояний, откуда в результате термической ионизации попадают в зону проводимости. Вольт-ваттная чувствительность этого эффекта в максимуме, соответствующем переходу $1s \rightarrow 2p$, может быть очень высокой ($\sim 10^4 \div 10^5$ в/вт), откуда следует, что в определенной области частот субмиллиметрового диапазона могут быть созданы приемники с очень высокой чувствительностью. Из измерений ударной ионизации примесей было получено, что временная постоянная фотоэффекта составляла около $5 \cdot 10^{-9}$ сек [5]; это показывает, что такого типа приемники должны обладать и очень малой инерционностью.

При облучении образцов n — GaAs при температуре 4,2°K модулированным излучением миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов с энергией кванта $h\nu$ значительно меньшей энергии, необходимой для перехода $1s \rightarrow 2p$, также наблюдается фотопроводимость. При этом вольт-ваттная чувствительность на длине волны 4 мм достигает значений $(0,5 \div 1) \cdot 10^3$ в/вт [6]. Из-за малости энергии кванта явление фотопроводимости в этом диапазоне волн не может быть объяснено фототермическим эффектом и, по-видимому, обусловлено другим механизмом.

Указанные эффекты фотопроводимости в n — GaAs являются весьма перспективными для создания приемных устройств, обладающих высокой чувствительностью в очень широком диапазоне частот.

2. Исследование отмеченных выше эффектов в n — GaAs с целью создания приемных устройств субмиллиметрового и коротковолновой части миллиметрового диапазонов проводилось на монокристаллических эпитаксиальных пленках n — GaAs, выращенных методом газотранспортных реакций с использованием в качестве исходных компонент хлоридов мышьяка и галлия. Пленки n — GaAs выращивались на подложке из полуизолирующего арсенида галлия с удельным сопротивлением $\sim 10^6 \div 10^7$ ом·см. Толщина исследованных пленок была 20 — 50 мкм. Контакты, с помощью которых прикладывалось электрическое смещение и снимался отклик, а также проводились измерения параметров пленки (проводимость и постоянная Холла), изготовлялись путем сплавления индия в водородной атмосфере при температуре 500°K. В табл. 1 приводятся параметры некоторых из исследованных пленок, полученные из измерений температурной зависимости постоянной Холла и проводимости по методике, аналогичной примененной в [7].

Таблица 1

№ образца	Максимальная подвижность (см ² /в·сек)	$N_d - N_a$ (см ⁻³)	$N_d + N_a$ (см ⁻³)	$\frac{N_a}{N_d}$	Термич. энергия активации (мэв)	λ_{\max} (мм)
1	$4,4 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^{14}$	$1,7 \cdot 10^{15}$	0,55	2,6	0,288
2	$8,3 \cdot 10^4$	$4,55 \cdot 10^{14}$	$1,0 \cdot 10^{15}$	0,38	3,08	0,285
3	$9,0 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^{14}$	$8,2 \cdot 10^{14}$	0,43	5,65	0,282
4	$8,7 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^{14}$	$6,6 \cdot 10^{14}$	0,74	4,05	0,284
5	$8,3 \cdot 10^4$	$5,0 \cdot 10^{13}$	$6,8 \cdot 10^{14}$	0,86	3,4	0,289
6	$1,7 \cdot 10^5$	$6,6 \cdot 10^{13}$	$3,3 \cdot 10^{14}$	0,66	3,65	0,286

В табл. 1 N_d — концентрация доноров, N_a — концентрация акцепторов и λ_{\max} — длина волны максимальной фоточувствительности.

Зависимости фотоотклика ΔU_{ϕ} и проводимости σ от электрического поля смещения, полученные на пленке n — GaAs при температуре 4,2°K, показаны на рис. 1*. Источником излучения в этом случае являлось излучение ртутно-кварцевой лампы ПРК-4 в диапазоне 0,1 ÷ 0,4 мм. Как следует из рис. 1, в области линейной зависимости фотоотклика от электрического поля проводимость не зависит от электрического поля.

На рис. 2 приведены температурные зависимости фотоотклика, полученные при облучении пленки n — GaAs субмиллиметровым излучением от ртутно-кварцевой лампы в диапазоне 0,1 ÷ 0,4 мм (кривая 1) и излучением с длиной волны 4 мм от клистронного источника (кри-

* На всех рисунках приводятся результаты, полученные на образце № 6 (см. табл. 1). Аналогичные результаты были получены и на остальных образцах, но образец № 6, как наиболее чистый из всех исследованных образцов, показывает максимальную фоточувствительность.

вая 2), а также температурная зависимость сопротивления пленки. Отклики снимались в линейной области вольт-амперной характеристики.

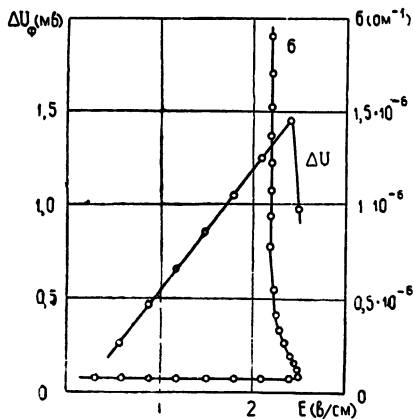


Рис. 1. Зависимость фотоотклика и проводимости от электрического поля смещения для эпитаксиальной пленки n -GaAs.

$\Delta\sigma$ — изменение проводимости пленки под действием излучения.

Изменение фотоотклика в зависимости от температуры может быть обусловлено двумя причинами: изменением с температурой темновой проводимости σ_0 и изменением $\Delta\sigma$, поскольку при измерении темпера-

$$\Delta U = U \frac{\Delta\sigma}{\sigma_0}, \quad (1)$$

где σ_0 — темновая проводимость пленки,

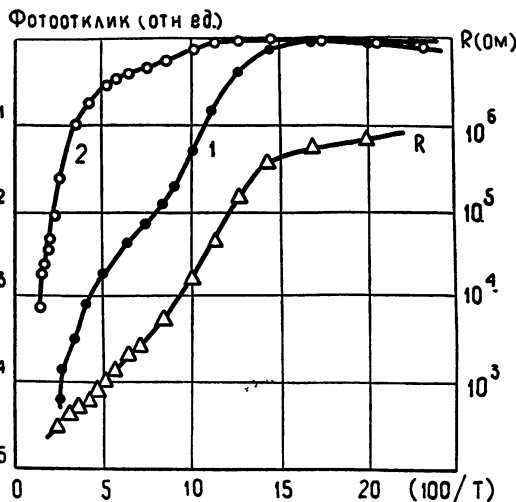


Рис. 2. Зависимость от температуры фотоотклика, полученного на эпитаксиальной пленке n -GaAs при облучении ее излучением от ртутно-кварцевой лампы в интервале $0,1 \div 0,4$ мкм (кривая 1) и от клистронного источника с длиной волны 4 мкм (кривая 2). Зависимость сопротивления пленки R от температуры.

турной зависимости фотоотклика величина U поддерживалась постоянной. Зависимость сопротивления пленки R , представленная на рис. 2, указывает на сильное увеличение проводимости с температурой. Зависимость $\Delta\sigma$ от температуры можно получить из (1), если воспользоваться

ся экспериментальными результатами по определению зависимости ΔU и σ_0 от температуры.

На рис. 3 (кривая 1) приведена полученная указанным способом

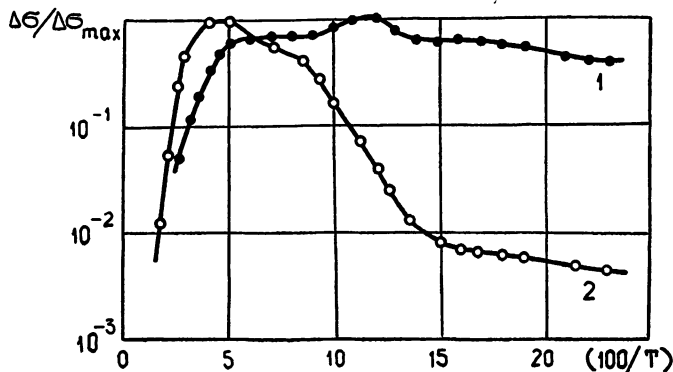


Рис. 3. Зависимость от температуры изменения проводимости пленки $\Delta\sigma$ под действием излучения;

1—излучение от ртутно-кварцевой лампы, 2—излучение от клистронного источника $\lambda=4$ мм.

зависимость $\Delta\sigma$, нормированная к $\Delta\sigma_{\max}$. Как следует из рис. 3, в температурном интервале $4,2 \div 20^\circ\text{K}$ $\Delta\sigma$ меняется незначительно. Таким образом, резкое уменьшение отклика от излучения коротковолновой части субмиллиметрового диапазона с повышением температуры пленки обусловлено увеличением с температурой проводимости σ_0 .

Поскольку величина $\Delta\sigma$ пропорциональна концентрации электронов на примесях в основном состоянии (1s), то следует ожидать сильного уменьшения $\Delta\sigma$ при температурах, когда заполнение этих состояний начнет истощаться. Гальвано-магнитные измерения на исследованных образцах показывают, что с увеличением температуры от $4,2^\circ\text{K}$ до 20°K заполнение этих состояний вследствие термоионизации уменьшается незначительно. С увеличением температуры выше $\sim 20^\circ\text{K}$ основные состояния примеси быстро опустошаются и, в соответствии с рис. 3, $\Delta\sigma$ уменьшается.

Температурная зависимость отклика в миллиметровом диапазоне представлена на рис. 2 (кривая 2). В интервале температур $4,2 \div 20^\circ\text{K}$ отклик меняется в 4—5 раз, тогда как проводимость пленки меняется на 3 порядка. Обратимся к рис. 3 (кривая 2), где представлена зависимость $\Delta\sigma/\Delta\sigma_{\max}$ от температуры. В области температур выше $\sim 7^\circ\text{K}$, где проводимость пленки определяется проводимостью по свободной зоне, величина $\Delta\sigma$ быстро растет. Принимая во внимание, что при этих температурах увеличение $\Delta\sigma$ хорошо коррелирует с увеличением населенности зоны проводимости и возбужденных примесных состояний, естественно предположить, что отклик в миллиметровом диапазоне при температурах $7 \div 20^\circ\text{K}$ обусловлен разогревом свободных электронов и переходом носителей с возбужденных примесных состояний в зону проводимости.

В области температур ниже 7°K величина $\Delta\sigma$ с температурой меняется слабо. В этой области температур доминирует проводимость по примесной полосе, которая имеет прыжковый характер с энергией активизации, определенной из наклона R от $1/T$ (рис. 2), $\epsilon = 6 \cdot 10^{-4}$ эв. Как следует из рис. 1, при $4,2^\circ\text{K}$ в области электрических полей, где отклик линейно зависит от поля, проводимость от электрического поля не зависит. По этой причине наблюдаемое явление фотопроводимости не

может быть объяснено разогревным механизмом (μ -фотопроводимостью), аналогичным тому, который имеет место, например, в чистых

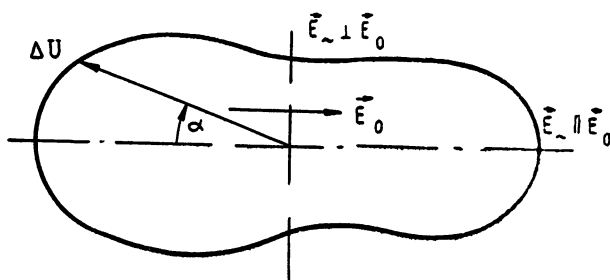


Рис. 4. Зависимость отклика в 4-миллиметровом диапазоне от поляризации падающего излучения, E_0 — вектор электрического поля смещения, E_{\sim} — вектор электрического поля волны. В случае, когда $E_{\sim} || E_0$, отклик в 3 раза больше, чем когда $E_{\sim} \perp E_0$.

монокристаллах n — InSb [1]. С другой стороны, обнаруженная в миллиметровом диапазоне волн сильная зависимость эффекта фотопроводимости от поляризации излучения (рис. 4), также указывает на неприемлемость механизма μ -фотопроводимости для объяснения эффекта. Наблюдаемый эффект фотопроводимости в n — GaAs в миллиметровом и длинноволновой части субмиллиметрового диапазонов волн при температурах менее 7°K, по-видимому, объясняется изменением под действием излучения прыжковой проводимости, другими словами, прыжковой фотопроводимостью, что, например, имеет место в p — CdSb [8] в аналогичных условиях. На рис. 5 приведена спектральная характеристика

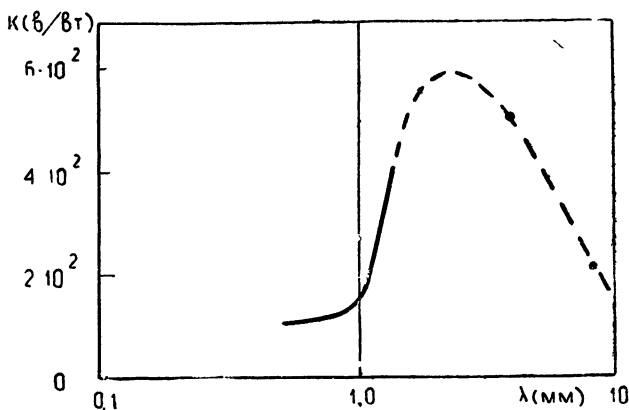


Рис. 5. Спектральная характеристика вольт-ваттной чувствительности (K) образца № 6. Сплошная кривая получена с использованием источника на ЛОВ, точки на 4-х и 8-ми миллиметрах получены с помощью клистронного генератора.

вольт-ваттной чувствительности. По характеру спектральная зависимость фотопроводимости подобна спектральной зависимости поглощения излучения на межпримесных прыжковых переходах [9], что подтверждает предположение о прыжковом механизме фотопроводимости в этом диапазоне волн.

3. Описанные выше эффекты в эпитаксиальных пленках n -GaAs были использованы при разработке приемника субмиллиметрового и миллиметрового излучения, блок-схема которого представлена на рис. 6. Конструкция чувствительной головки приемника состоит из световода диаметром 10 мм (1), по которому осуществляется канализация излучения и конуса (2), концентрирующего излучение на чувствительном элементе (3), представляющем собой эпитаксиальную пленку n -GaAs толщиной $20 \div 50$ мкм на полупроводниковой подложке из GaAs. Рабочая поверхность пленки, на которую фокусируется излучение, имеет диаметр 2,5 мм. Пленка охлаждается жидким гелием, для

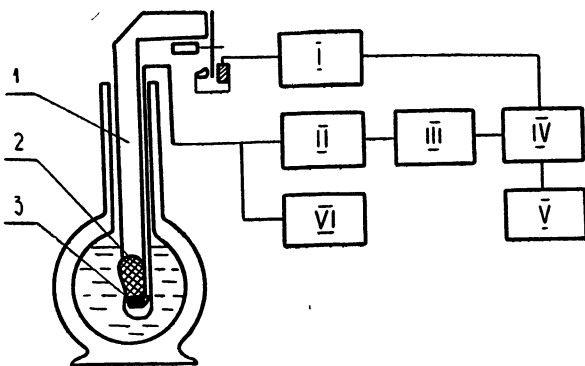


Рис. 6. Блок-схема приемника субмиллиметрового диапазона на основе эпитаксиальной пленки n -GaAs: I — блок формирования опорного сигнала, II — предусилитель, III — усилитель сигнала В6-4, IV — синхронный детектор СД-1, V — самописец, VI — схема смещения.

чего используется стандартный транспортный дюар для перевозки и хранения жидкого гелия, в который вставляется световод с конусом и пленкой n -GaAs. Излучение, поступающее в чувствительную головку, может модулироваться механическим модулятором. Собственно приемник, помимо чувствительной головки, включает схему смещения, генератор опорного сигнала, предусилитель, усилитель В6-4, синхронный детектор и самописец. Охлаждение чувствительного элемента приемника непосредственно в транспортном дюаре [10] обеспечивает непрерывную работу приемника (без дополнительной заливки гелия) в течение двух недель.

С помощью описанной конструкции приемника субмиллиметрового диапазона волн были записаны спектры излучения монохроматора в диапазоне от 0,06 до 1,5 мм. На рис. 7 приведена спектральная характеристика приемника в области наибольшей чувствительности. Среднее положение максимума фотоотклика, по нашим измерениям, соответствует

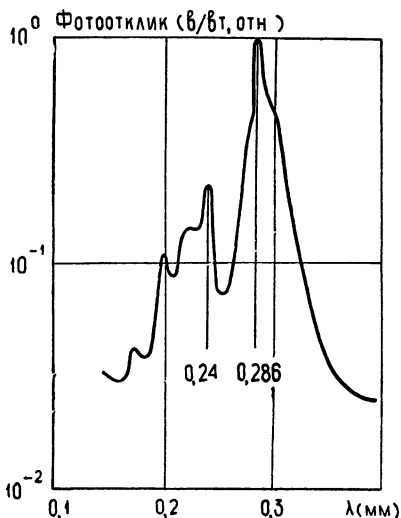


Рис. 7. Спектральная характеристика приемника на основе эпитаксиального n -GaAs. Максимумы при $\lambda = 286$ мкм и $\lambda = 240$ мкм обусловлены фототермическим эффектом при фотовозбуждении носителей из основного состояния $1s$ в состоянии $2p$ и $3p$.

длине волны 0,286 м. Принимая во внимание, что точность измерений положения максимума спектральной характеристики составляла $\pm 2\%$, можно утверждать, что наши результаты хорошо согласуются с данными работ [11, 12]. Положение максимума фотоотклика λ_{\max} практически не зависит от термической энергии ионизации мелких доноров, которая значительно меняется от образца к образцу (см. табл. 1).

Энергия уровней мелких донорных примесей в n -GaAs хорошо описывается в рамках водородоподобной модели выражением

$$E_n = 13,5 \frac{m^*}{m_0} \frac{1}{\epsilon^2} \frac{1}{n^2} \text{ (эВ)}. \quad (2)$$

Для n -GaAs значения диэлектрической проницаемости и эффективной массы составляют $\epsilon = 12,5$, $m^* = 0,067 m_0$. Расчетные значения длин волн квантов излучения, соответствующих переходам $1s \rightarrow 2p$ и $1s \rightarrow 3p$, полученные с помощью (2), соответственно равны 0,282 м и 0,238 м, что хорошо согласуется с экспериментальными результатами (рис. 7) — 0,286 м и 0,240 м.

Оценка величины вольт-ваттной чувствительности приемника на основе n -GaAs проводилась путем сравнения с приемником из n -InSb с известной спектральной характеристикой. Вольт-ваттная чувствительность приемника на n -GaAs в максимуме fotocувствительности ($\lambda_{\max} = 0,286$ м; рис. 7) составляла $\geq 4 \cdot 10^4$ в/вт, а предельная обнаружимая мощность была $\leq 10^{-12}$ вт/гц^{1/2}. Оценка поглощения излучения в пленке n -GaAs, использованной в описанном приемнике, показывает, что даже в пиках 0,286 м и 0,240 м поглощается небольшая часть падающей на пленку мощности излучения. В спектральном участке длиннее 0,35 м поглощается лишь незначительная часть падающей на пленку мощности. Следовательно, путем увеличения толщины эпитаксиальной пленки и помещения ее в интегрирующую камеру чувствительность приемника может быть значительно увеличена.

При работе приемника в режиме радиометра была измерена интегральная температурная чувствительность ΔT , которая была не хуже, чем 0,006°К. Частота модуляции радиометра $f_{\text{мод}} = 1$ кГц, постоянная времени радиометра $\tau = 1$ сек. Измерения проводились при температуре черного тела $20 \div 100^\circ\text{C}$, помещенного у входного фланца приемника, диаграмма направленности которого составляла $\sim 13^\circ$. Температурная чувствительность получена с помощью выражения

$$\Delta T = \frac{\delta T}{\delta U} \sqrt{U_{\text{ш}}^2}, \quad (3)$$

где $\sqrt{U_{\text{ш}}^2}$ — средне-квадратичное значение напряжения шума, а δU — приращение сигнала при изменении температуры черного тела на δT^* . При измерении интегральной чувствительности имело место поглощение излучения парами воды атмосферы на пути 1 м. По этой причине зафиксированная величина температурной чувствительности ΔT несколько хуже из-за потерь в тракте передачи излучения.

Представляет интерес провести сравнение результатов исследования приемника на основе n -GaAs в радиометрическом режиме с радиометром на основе n -InSb [2], с которым в диапазоне 0,15 \div 1,5 м была получена температурная чувствительность $\Delta T = 0,003^\circ\text{K}$ при

* Ввиду высокой чувствительности радиометра измерения средне-квадратичного значения шума $\sqrt{U_{\text{ш}}^2}$ и δU проводились на разных шкалах, так как δT составляло несколько градусов.

диаграмме направленности 84° . Несложный расчет показывает, что если в приемнике на основе n —GaAs, используя иммерсию, увеличить светосилу до светосилы радиометра [2], то его интегральная температурная чувствительность улучшится на порядок, т. е. станет не более, чем $0,0006^\circ\text{K}$.

В заключение подчеркнем, что описанный приемник на эпитаксиальной пленке n —GaAs еще далек от оптимального. Имеются неиспользованные возможности по повышению чувствительности, например, путем использования более толстых пленок с большей подвижностью носителей тока, чем пленка 6 (см. табл. 1). Это приведет к значительному увеличению чувствительности и в областях спектра вдали от $\lambda = 0,286$ мм, как уже отмечалось, за счет увеличения поглощения излучения; вследствие увеличения проводимости таких пленок, будут снижены их тепловые шумы. Использование иммерсии позволит увеличить диаграмму направленности приемника, что даст значительный выигрыш при использовании его в качестве радиометра.

Авторы считают приятным долгом выразить благодарность А. Н. Выставкину, Ю. В. Гуляеву, В. Ф. Дворянкину, В. В. Мигулину и А. В. Соколову за внимание к работе, В. Н. Листвину за полезные дискуссии и Н. Г. Яременко за помощь в проведении исследований параметров пленок.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Выставкин, В. Н. Листвин, В. Д. Штыков, ПТЭ, № 4, 228 (1966).
2. А. Н. Выставкин, В. Н. Листвин, А. Д. Моренков, ПТЭ, № 3, 183 (1970).
3. F. J. Low, J. Opt. Soc. Amer., 51, 1300 (1961).
4. Y. Oka, K. Nagasaka, S. Narita, J. Appl. Phys., 7, 611 (1968).
5. G. E. Stillman, C. M. Wolf, J. Melngailis, C. D. Parker, P. E. Tanpenwald, J. O. Dimmock, Appl. Phys. Lett., 13, 83 (1968).
6. В. М. Афиногенов, С. А. Айтхожин, А. А. Телегин, В. И. Трифонов, Авторефераты докладов IX Всесоюзной конференции по распространению радиоволн, Харьков, 1969, стр. 101.
7. С. А. Айтхожин, Н. А. Белова, В. Е. Любченко, А. А. Телегин, ФТП, 4, 965 (1970).
8. В. М. Афиногенов, Г. И. Гончаренко, В. И. Трифонов, В. Я. Шевченко, Письма в ЖЭТФ, 10, 370 (1969).
9. J. Blinowski, J. Myselski, Phys. Rev., 140, A 1024 (1965).
10. Н. Г. Афонченков, А. Н. Выставкин, В. Н. Листвин, А. Д. Моренков, ПТЭ, № 6 (1970).
11. G. E. Stillman, C. M. Wolf, J. O. Dimmock, Solid State Commun., 7, 921 (1969).
12. G. E. Stillman, C. M. Wolf, J. O. Dimmock, Symposium on Submillimeter Waves, N. Y. (march—april), 1970.

Институт радиотехники и электроники
АН СССР

Поступила в редакцию
11 января 1971 г.
после доработки
3 марта 1972 г.

HIGH-SENSITIVE SUBMILLIMETER RECEIVER ON n-GaAs

V. M. Afinogenov, S. A. Ayt Khozhin, V. A. Strakhov,
A. A. Telegin, V. I. Trifonov

On the basis of epitaxial n —GaAs films grown from the vapour phase by the gaseous-transport reaction method a submillimeter receiver has been designed. The receiver has a spectral characteristic with a maximum at the wavelength $\lambda = 0,286$ mm where the volt-watt sensitivity amounts to $4 \cdot 10^4$ v·w⁻¹ and the limiting sensitivity is not less than 10^{-12} w/s^{1/2}. In the radiometer regime the sensitivity to be the black body temperature variation has been achieved to be not less than $0,006^\circ\text{K}$ at the constant time $\tau = 1$ sec. The receiver beamwidth is of 13° , the input diameter of the lightguide is of 10 mm.