

Записывая (24) для $I_{[i+1]}(1, 0)$, а затем, используя (10) с последующим применением формулы Фробениуса, получаем

$$I_{[i+1]}(1, 0) = \frac{1}{2} \operatorname{tr} [(I_{im} + D) + (I_{im} + D)^{-1}] - im. \quad (25)$$

Из выражения для следа матрицы через ее спектр ([6, 7]) и формул (24), (25) получаем (23). При этом существенно свойство $D \geq B \geq 0$, которое приводит к (22), так как из него следует ([6, 7]), что $\lambda_j(D) \geq \lambda_j(B) \geq 0$, $1 \leq j \leq im$.

Следствие. Для $I_{[i]}(1, 0)$ имеет место эквивалентная (21), (24) формула

$$I_{[i]}(1, 0) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{im} \frac{1 + [1 + \lambda_j(B)]^2}{1 + \lambda_j(B)} - im,$$

которая непосредственно вытекает из (24).

В конкретных системах, как правило, имеются измерительные элементы, отказы которых легко обнаруживаемы, и элементы с плохо обнаруживаемыми отказами. С использованием $I_{[i]}(1, 0)$ можно все датчики разбить на две группы: с большими значениями $I_{[i]}(1, 0)$, указывающими на хорошую различимость отказов датчиков данной группы, и с малыми значениями $I_{[i]}(1, 0)$, указывающими на плохую различимость отказов. Для датчиков второй группы следует использовать высокочувствительные, хотя и достаточно сложные, оптимальные алгоритмы обнаружения [9], а для датчиков первой группы можно применять менее чувствительные простые эвристические алгоритмы [10].

Из результатов теоремы 2 следует, что имеет смысл иметь один резервный блок с элементами большей надежности (хотя бы за счет увеличения его стоимости), что увеличит достоверность обнаружения отказов в остальных резервных блоках.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин Н. С., Жадан Л. И. Синтез и анализ алгоритма фильтрации для дискретных сигналов с аномальными помехами // Радиотехника и электроника.— 1984.— 29, № 2.
2. Демин Н. С., Жадан Л. И. Об оптимальности процедуры исключения аномальных измерений // Автометрия.— 1983.— № 4.
3. Жадан Л. И. К процедуре исключения аномальных измерений // Автометрия.— 1985.— № 2.
4. Браславский Д. А. Приборы и датчики летательных аппаратов.— М.: Машиностроение, 1970.
5. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц.— М.: Наука, 1966.
6. Ланкастер П. Теория матриц.— М.: Наука, 1982.
7. Воеводин В. В., Кузнецов Ю. А. Матрицы и вычисления.— М.: Наука, 1984.
8. Кульбак С. Теория информации и статистика.— М.: Наука, 1967.
9. Фукунага К. Введение в статистическую теорию распознавания образов.— М.: Наука, 1979.
10. Демин Н. С., Жадан Л. И. Некоторые адаптивные варианты фильтра Калмана — Бьюси для дискретных систем // Адаптация и обучение в системах управления и принятия решений.— Новосибирск: Наука, 1982.

Поступило в редакцию 25 мая 1987 г.

УДК 621.382.2

С. С. БОЛГОВ, И. И. ГОЛОВАЧ, В. Н. КАБАЦИЙ,
В. К. МАЛПОТЕНКО, З. И. ПЕРЧИ, Е. И. ЯБЛОНОВСКИЙ
(Киев)

ИК-ИЗЛУЧАТЕЛИ С БЕЗБАРЬЕРНЫМ МЕХАНИЗМОМ ИНЖЕКЦИИ

Введение. Полупроводниковые инжекционные светодиоды в настоящее время являются основным элементом оптических и оптоэлектронных устройств обработки информации. Широкое практическое использование светодиодов обусловлено как низкой стоимостью и простотой изготовления, так и хорошими эксплуатационными характеристиками (высокая надежность, значительные мощности излучения, высокое быстродействие и т. д.). Однако область их применения — это видимый и ближний ИК-диапазоны ($\lambda \leq 2,5$ мкм). Такое ограничение является принципиальным и объясняется следующим обстоятельством. В качестве материала для изготовления светодиодов более длинноволнового излучения необходимо использовать узкозонные полупроводники, в которых барьерный механизм инжекции носителей заряда (в том

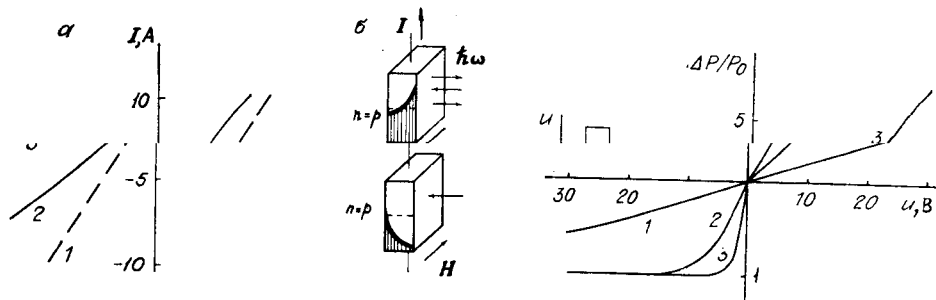


Рис. 1. Вольт-амперные характеристики излучателя, $u > 0$ — режим обогащения, $u < 0$ — режим истощения (Н, кЭ):

кривая 1 — 0; 2 — 3; 3 — 10 (а). В исходном состоянии распределение носителей тока в кристалле однородно. Мощность теплового излучения грани s_{\min} равна мощности P_0 , поглощаемой кристаллом из окружающей среды (центральный рисунок). В режиме обогащения грань s_{\min} становится источником избыточного неравновесного излучения ($\Delta P = P - P_0 > 0$ (верхний рисунок)). В условиях истощения мощность излучения ниже равновесной ($\Delta P = P - P_0 < 0$, отрицательная люминесценция, нижний рисунок) (б)

Рис. 2. Полевые зависимости мощности излучения, $u > 0$ — режим обогащения, $u < 0$ — режим истощения (Н, кЭ):

кривая 1 — 0,5; 2 — 3; 3 — 10. На вставке: при перемене знака питающего напряжения происходит смена контраста излучения по отношению к уровню равновесного теплового излучения P_0

числе и с помощью $p-n$ -перехода) оказывается малоэффективным при высоких температурах ($T \geq 300$ К). Поэтому такие светодиоды могут быть использованы лишь в системах, допускающих применение специальных холодильников или криогенных жидкостей.

В настоящей работе описывается нетрадиционный ИК-излучатель с безбарьерной «магнитной» инжекцией неравновесных носителей заряда в активную (излучающую) область однородного полупроводникового кристалла. Кратко излагаются принцип действия прибора, его конструкция с излучающим элементом из антимонида индия, обсуждаются характеристики и важнейшие параметры, а также предполагаемые области применения.

Принцип действия. Если однородная полупроводниковая пластина с собственной проводимостью ($n_0 = p_0 = n_i$) и омическими контактами находится в скрещенных электрическом E и магнитном H полях, то пространственное распределение электроно-дырочных пар ($n = p$) по сечению кристалла отклоняется от равновесного значения (магнитоцентриционный эффект [1]). Такое перераспределение эффективно проявляется в пластине, толщина которой сравнима с биполярной диффузионной длиной носителей заряда, а противоположные грани характеризуются малой s_{\min} и большой s_{\max} скоростями поверхностной рекомбинации (рис. 1, б). При одном направлении силы Лоренца концентрация электроно-дырочных пар у грани с s_{\min} возрастает, оставаясь в большей части кристалла близкой к равновесной (режим обогащения). При перемене знака E или H почти весь объем кристалла истощается вследствие выноса носителей из объема на грань с s_{\max} (режим истощения).

В результате изменения полного числа носителей заряда в кристалле его вольт-амперная характеристика становится асимметричной, выпрямляющей (см. рис. 1). Изменение же приповерхностной концентрации носителей у грани с s_{\min} приводит в режиме обогащения к возникновению люминесценции в спектральном диапазоне межзонных переходов полупроводника $\hbar\omega \geq E_g$ (E_g — ширина запрещенной зоны) либо к уменьшению мощности теплового излучения грани в этом же спектральном диапазоне в режиме истощения (отрицательная люминесценция). Таким образом, в зависимости от условий возбуждения излучающая грань кристалла с малой скоростью поверхностной рекомбинации становится источником позитивного или негативного контраста (рис. 2). Подробные сведения о физике протекающих в этих условиях процессов, а также соответствующие расчеты представлены в [2, 3].

Конструктивное исполнение. На рис. 3 представлены две разновидности излучателя. Излучающий элемент выполнен из монокристалла InSb (с собственной проводимостью) в виде тонкой пластины размерами $0,5 \times 0,2 \times 0,02$ см с индиевыми контактами на торцах, расположенной между полюсами миниатюрного постоянного магнита из SmCo_5 ($H = 3 \cdot 10^8$ Э). Верхняя грань пластины протравлена ($s_{\min} \leq 2 \cdot 10^4$ см/с) и герметизирована полусферическим куполом из халькогенидного



Рис. 3. Внешний вид излучателей

стекла*, нижняя обработана алмазной пастой ($s_{\max} \approx 10^6$ см/с). Пластина укреплена на сапфировой подложке, находящейся в тепловом контакте с металлическим радиатором, обеспечивающим отвод тепла и стабилизацию температуры излучателя.

Вся конструкция расположена в цилиндрическом металлическом корпусе диаметром 22 мм, нижним основанием которого служит радиатор с двумя изолированными от корпуса токевыми выводами, а в верхнем укреплена линза из BaF_2 либо окно из просветленного Ca (длина корпуса 29 и 15 мм соответственно). Масса излучателя не превышает 30 г.

Характеристики и параметры. Полевые зависимости интегральной мощности излучения (в импульсном режиме) представлены на рис. 2. В режиме обогащения мощность сигнала люминесценции увеличивается с ростом управляющего воздействия, при больших полях имеется тенденция к насыщению. В режиме истощения четко выражена область насыщения излучаемой мощности: амплитуда модулированного сигнала достигает своего максимального значения — мощности равновесного излучения ($\Delta P = P - P_0 = -P_0$) в диапазоне межзонных переходов. Величина P_0 легко поддается оценке, так как определяется температурой кристалла и его E_g . В частности, для InSb при 300 К $P_0 = 2 \cdot 10^{-3}$ Вт/см², следовательно, мощность излучения в режиме обогащения (см. рис. 2) может достигать в импульсе $1 \cdot 10^{-2}$ Вт/см². В конструкции с линзой угол расходимости излучения 15°.

Спектр излучения при $T = 300$ К представлен на рис. 4 и имеет вид, характерный для межзонного рекомбинационного излучения прямозонных полупроводников. Положение максимума $\lambda_{\max} = 7$ мкм определяется E_g — шириной запрещенной зоны InSb , с повышением температуры λ_{\max} смещается в длинноволновую область в соответствии с уменьшением E_g . Полуширина спектра $\Delta\lambda \sim 1$ мкм типична для ИК-источников спонтанного излучения**. С ростом напряжения питания (или увеличением I) максимум в спектре излучения в режиме обогащения смещается в коротковолновую область вследствие вырождения электронного газа в зоне проводимости [4], спектр излучения в режиме истощения практически не деформируется.

Быстродействие излучателя определяется временем генерации-рекомбинации носителей заряда в используемом материале и в обсуждаемой конструкции не превышает $2 \cdot 10^{-8}$ с при $T = 300$ К. В конструкции излучателя предусмотрена возможность его эксклюзации в импульсном (предельные мощности излучения определяются возможностями отвода выделяемого в активном элементе тепла) и синусоидальном режимах работы.

Рекомендации к использованию. Предлагаемый излучатель с безбарьерным механизмом инжекции предназначен для использования при комнатной и повышенной температурах, однако сохраняет работоспособность даже при $T \sim 150$ К; предельный режим работы определяется температурой индиевых контактов и размягчения герметизирующего покрытия ($T \lesssim 400$ К). Прибор может применяться для контроля параметров приемников и полупроводниковых материалов, а также в системах оптической обработки информации, в окне пропускания атмосферы 3–5 мкм. Он будет полезен в качестве источника опорных световых сигналов в приборах газового анализа, измерителях влажности (см. рис. 4) и т. д. Спектр излучения может быть расширен на область 8–14 мкм, если в качестве материала активного элемента использовать полупроводниковое соединение $\text{Cd}_x\text{Hg}_{1-x}\text{Te}$, в котором, как показано в [5], безбарьерный механизм инжекции неравновесных носителей также эффективен.

* Защитное халькогенидное покрытие не только обеспечивает герметизацию излучающего элемента и стабилизацию его параметров, но также увеличивает внешний квантовый выход излучения.

** Напомним, что ширина спектра излучения увеличивается с ростом длины волны излучателя ($\Delta\lambda \sim \lambda_{\max}^2$), если $\frac{\hbar\omega}{kT} \gg 1$.

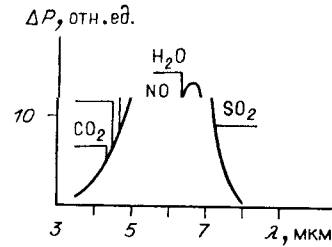


Рис. 4. Спектр излучения при $T = 300$ К.

Вертикальными линиями указаны характерные линии поглощения паров воды и некоторых газов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Welker H. Zur Theorie der galvanomagnetischen Effekte bei gemischten Leitung // Z. Naturforsch.— 1951.— A6, N 2.— S. 184.
2. Болгов С. С., Малютенко В. К., Пипа В. И. Люминесценция полупроводников в условиях дефицита носителей тока // ФТП.— 1983.— 17, вып. 2.
3. Болгов С. С., Малютенко В. К., Пипа В. И. Рекомбинационное излучение полупроводников в скрещенных электрическом и магнитном полях при нелинейных механизмах рекомбинации // УФЖ.— 1986.— 31, № 2.
4. Иванов-Омский В. И., Коломиец Б. Т., Смирнов В. А. Спектр элекромагнитолюминесценции в InSb // Письма в ЖЭТФ.— 1966.— 3, вып. 7.
5. Малютенко В. К., Яблоновский Е. И., Болгов С. С. и др. Отрицательная люминесценция в CdHgTe // ФТП.— 1984.— 18, вып. 2.

Поступило в редакцию 30 марта 1988 г.

УДК 621.317.7

Н. П. КРАСНЕНКО, В. А. ФЕДОРОВ
(Томск)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХТОЧЕЧНОГО КОРРЕЛЯЦИОННОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ ШУМОВ

В работе [1] проведено исследование точностных характеристик двухточечного корреляционного метода (ДКМ) измерения частоты узкополосных стационарных случайных процессов. Отмечается большая величина систематической ошибки при недостаточном высоком отношении сигнал/шум (С/Ш). Это объясняется тем, что основой ДКМ является первоначальное оценивание двух отсчетов корреляционной функции (КФ) $B(\tau)$ смеси сигнала и всегда присутствующего на практике шума при $\tau = 0$ и $\tau_1 = 1/4 f_{оп}$:

$$\widehat{B}(\tau) = \frac{1}{T - |\tau|} \int_0^{T-|\tau|} x(t) x(t + |\tau|) dt, \quad (1)$$

где $x(t) = s(t) + n_1(t)$ — аддитивная смесь реализаций сигнала $s(t)$ и шума $n_1(t)$ за время наблюдения T ; $f_{оп}$ — некоторая опорная частота, относительно которой происходит измерение частоты f_c сигнала $s(t)$. При некоррелированности $s(t)$ и $n_1(t)$ среднее измеренное значение $M[\widehat{B}(\tau)]$ будет складываться из истинного сигнала $B_c(\tau)$ и смещения, определяемого шумовой составляющей $B_{ш}(\tau)$, т. е. $M[\widehat{B}(\tau)] = B(\tau) = B_c(\tau) + B_{ш}(\tau)$. Поэтому для уменьшения систематических ошибок измерения частоты необходимо осуществить нейтрализацию шума в оценке КФ (1). Такая возможность на практике часто существует. Например, при акустическом зондировании атмосферы можно измерить шумы до отправки сигнала в атмосферу или после его приема. И если средние статистические характеристики шума достаточно стабильны за полное время измерений, то можно осуществить его компенсацию в двух указанных точках КФ (1), т. е. несмещенная оценка КФ сигнала имеет вид $\widehat{B}_c(\tau) = \widehat{B}(\tau) - \widehat{B}_{ш}(\tau)$, где

$$\widehat{B}_{ш}(\tau) = \frac{1}{T_{ш} - |\tau|} \int_0^{T_{ш}-|\tau|} n_2(t) n_2(t + |\tau|) dt$$

— оценка КФ шума по реализации $n_2(t)$ длительностью $T_{ш}$. Отсюда оценка частоты ДКМ принимает вид

$$\widehat{f}_{с,к} = \frac{1}{2\pi\tau_1} \arccos \frac{\widehat{B}_c(\tau_1)}{\widehat{B}_c(0)}. \quad (2)$$

Также отметим, что при измерении шумов зачастую нет таких жестких ограничений, которые накладываются на длительность анализа T при реализации оценки (1). Поэтому становится возможным измерять $B_{ш}(0)$ и $B_{ш}(\tau_1)$ с достаточно высокой статистической точностью, например, путем формирования оценки выборочного среднего этих значений: $M^*[\widehat{B}_{ш}(\tau)] = \sum_{i=1}^L \widehat{B}_{ш,i}(\tau)/L$, где $\widehat{B}_{ш,i}(\tau)$ — оценка КФ шума по его i -й реализации; L — число реализаций. Тогда, вместо оценки (2), можно использовать аналогичную оценку $\widehat{f}_{с,к}$ с заменой в (2) $\widehat{B}_c(\tau)$ на $\widehat{B}_c(\tau) = \widehat{B}(\tau) - M^*[\widehat{B}_{ш}(\tau)]$.