

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.783.25

В. Н. Легкий*(Новосибирск)***АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
СИСТЕМ БЛИЖНЕЙ ЛОКАЦИИ**

Предложено в системах ближней локации при обнаружении объектов на расстоянии десятков–единиц метров управлять длительностью зондирующих импульсов в диапазоне $\tau = 200\text{--}1$ нс для реализации максимальной дальности действия и высокой разрешающей способности импульсного метода дальнометрии. Показано использование запаса средней мощности передатчика, полученного за счет перехода в наносекундный диапазон, для повышения частоты следования импульсов, что важно при малом времени взаимодействия систем ближней локации со скоростными объектами. Определены требования к энергетическим характеристикам полупроводниковых лазеров при разработке наносекундных датчиков для автоматических систем с учетом обнаружительной способности фотоприемного устройства. В результате экспериментальных исследований отмечена способность инжекционных лазеров с импульсной мощностью 10–1000 Вт работать с частотой следования коротких импульсов ($\tau \leq 20$ нс) $f_c = 30\text{--}50$ кГц.

Системы ближней локации (СБЛ), решающие задачу обнаружения объектов и измерения расстояния в широком интервале (десятки–единицы метров), должны обеспечивать противоречивое требование: достаточную дальность действия при высокой разрешающей способности. В случае импульсного метода дальнометрии для реализации приемлемого отношения сигнал/шум на максимальном расстоянии целесообразно использовать узкополосное приемное устройство. Вблизи скоростного лоцируемого объекта точность измерений достигается за счет формирования передатчиком коротких импульсов с высокой частотой следования. Ограниченная средняя мощность излучения инжекционных лазеров определяет необходимость адаптивно перестраивать параметры передатчика (длительность зондирующих импульсов в диапазоне $\tau = 200\text{--}1$ нс) и приемника (сопротивление нагрузки и полосу пропускания фотоприемника).

Анализ обнаружительной способности фотоприемного устройства (ФПУ) позволяет оценить требования к энергетическим характеристикам полупроводниковых лазеров при разработке наносекундных датчиков для автоматических систем.

Генераторы накачки инжекционных лазеров (ИЛ), как правило, содержат накопительную емкость, которая разряжается через коммутирующий ключе-

вой элемент, формируя токовый импульс экспоненциальной формы [1]. ФПУ для приема наносекундных сигналов состоит из фотодиодного приемника с нагрузкой в виде RC -цепи и импульсного усилителя [2]. Амплитуда сигнала на сопротивлении R для экспоненциальных входных импульсов находится с помощью импульсной характеристики фотоприемника [3, 4]:

$$U = IR(T/\tau)^{T/(\tau - T)}, \quad (1)$$

где $I = P_{\text{вх}}S$ – амплитуда сигнального фототока, $P_{\text{вх}}$ – мощность сигнала на чувствительной площадке фотодиода (ФД), S – крутизна ампер-ваттной характеристики ФД; $T = RC$ – инерционность фотоприемника, C – эквивалентная емкость фотоприемника, R – эквивалентное сопротивление нагрузки фотодиода по переменному току, учитывающее входное сопротивление последующего усилителя; $\tau = 1/\alpha$ – длительность нормированного по энергии прямоугольного импульса, α – коэффициент затухания экспоненциального импульса.

В случае неизменной полосы пропускания фотоприемника при сокращении длительности со 100 до 5 нс ($T = 100$ нс) согласно (1) амплитуда сигнала снижается в 8,6 раза. При компенсации этих потерь амплитуды за счет импульсной мощности передатчика средняя мощность излучения снижается в 2,3 раза, т. е. возможна модернизация дальномерных систем по сокращению или введению переключения длительности излучаемых импульсов без ухудшения отношения сигнал/шум.

Для квазиоптимального приемника полоса пропускания выбирается из условия максимизации отношения сигнал/шум для конкретной длительности принимаемых импульсов. При этом необходимо учитывать шумы фотодиода, сопротивления нагрузки и усилителя. Дисперсия напряжения дробового шума фотодиода [2] $D_{\phi} = NR/2C$, где $N = qI$ – спектральная плотность мощности дробового шума ФД в бесконечных частотных пределах, q – заряд электрона, $I = I_{\tau} + I_{\phi}$ (I_{τ} – темновой ток фотодиода, I_{ϕ} – фототок фонового излучения). Дробовой шум фотодиода определяется значениями $I_{\tau} = 0,5\text{--}2$ мкА, $I_{\phi} \leq 1$ мкА при использовании полосового оптического фильтра с полосой пропускания около 40 нм. Характерно, что при расширении полосы пропускания в результате снижения сопротивления нагрузки R дисперсия шумового напряжения пропорционально уменьшается.

Дисперсия теплового шума сопротивления нагрузки определяется формулой $D_{\text{н}} = kt/C$, где k – постоянная Больцмана, а t – абсолютная температура. При эквивалентной емкости $C = 10$ пФ шум нагрузки характеризуется дисперсией $D_{\text{н}} = 200$ мкВ². Дисперсию шумового напряжения усилителя, пересчитанного к его входу, обозначим $D_{\text{у}} = U_{\text{ш}}^2$. Среднеквадратическое значение шумового напряжения $U_{\text{ш}}$ усилителя на транзисторах 2ПЗ12, 2ТЗ101, 2ТЗ115 при полосе пропускания 20–200 МГц составляет 5–50 мкВ.

Отношение сигнал/шум находится как отношение амплитуды сигнала (1) к среднеквадратическому значению шумового напряжения $U_{\Sigma} = (D_{\phi} + D_{\text{н}} + D_{\text{у}})^{1/2}$ [2]:

$$\gamma = P_{\text{вх}} S \tau (D_{\phi} + D)^{-1/2} (T/\tau)^{T/(\tau - T)} / C,$$

где $D = D_{\text{н}} + D_{\text{у}}$. Его значение достигает максимума γ_{max} при оптимальной постоянной времени $T_m = R_m C$, которая обеспечивается выбором соответст-

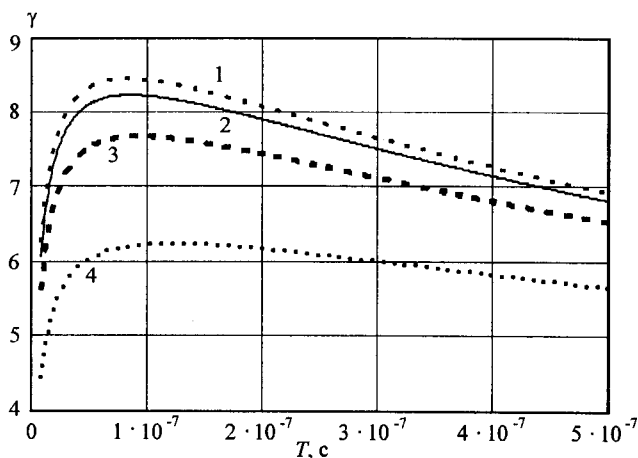


Рис. 1. Зависимость отношения сигнал/шум от инерционности нагрузки при $\tau = 2$ нс, $C = 10$ пФ: кривая 1 – $U_m = 0$; 2 – 5; 3 – 10; 4 – 20 мкВ

вующего сопротивления нагрузки фотодиода (рис. 1). Графики рассчитаны для коротких импульсов ($\tau = 2$ нс), т. е. для случая обнаружения объектов на расстояниях 3–5 м, когда обеспечивается уровень полезного сигнала $I = 1$ мкА при мощности ИЛ единицы ватт. Пороговый уровень схемы обработки соответствует значению $\gamma = 7$.

Характерно, что для увеличения амплитуды сигнала на выходе ФПУ можно использовать сопротивление R , большее R_m (R_m – квазиоптимальное сопротивление нагрузки). При этом отношение сигнал/шум снижается незначительно, например, при $R = 5R_m$ всего на 18 %.

Значения R_m , γ_{\max} можно найти, решая уравнение

$$\frac{2D}{qI_\phi} = \frac{R_m^2}{2\tau} \left(1 - \frac{2\tau}{R_m C} + e^{\tau/R_m C} \right).$$

Рассчитанные значения R_m как функции длительности импульсов показаны на рис. 2. Реализация полученного сопротивления нагрузки возможна

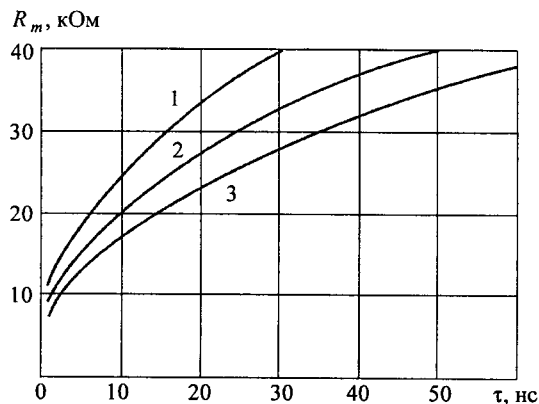


Рис. 2. Зависимость оптимального сопротивления нагрузки от длительности импульсов: кривая 1 – $U_m = 0$; 2 – 10; 3 – 20 мкВ

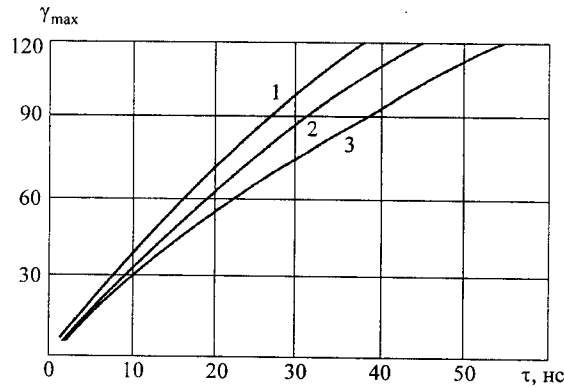


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал/шум на выходе квазиоптимального фотоприемника от длительности импульсов: кривая 1 – $U_{ш} = 0$; 2 – 10; 3 – 20 мкВ

при использовании входного усилительного каскада на полевом транзисторе или на биполярном транзисторе с последовательной отрицательной обратной связью [5].

При регулировании длительности импульсов сопротивление R_m изменяется, соответственно изменяются амплитуда напряжения сигнала, полоса пропускания, дисперсия шумов и чувствительность фотоприемного устройства (рис. 3).

При длительности сигналов $\tau = 200$ нс квазиоптимальный ФПУ имеет полосу пропускания всего 0,16–0,22 МГц, в результате при выбранном неизменном уровне полезного сигнала на входе СБЛ отношение γ (см. рис. 3, кривые 1–3) достигает значений 391, 373, 335 соответственно. Таким образом, чувствительность квазиоптимального ФПУ в диапазоне длительностей $\tau = 2–200$ нс изменяется в 45–55 раз.

В оптоэлектронных системах с узкой диаграммой излучения весь световой поток попадает на отражающую поверхность [6]. Тогда по формуле ближней светолокации мощность сигнала, принимаемого ФПУ от поверхности объекта с коэффициентом отражения ρ , имеет квадратичную зависимость от расстояния r :

$$P_{\text{вх}} = P_{\text{изл}} \frac{k_0 d^2}{8r^2} f(\beta) \rho.$$

Здесь k_0, d – коэффициент пропускания и диаметр объектива оптической системы ФПУ; $f(\beta)$ – индикатриса рассеяния поверхности. Для ламбертовой поверхности в перпендикулярном направлении $f(\beta = 0) = 2$. При выбранном пороговом уровне схемы обработки ($\gamma = 7$) дальность действия системы превышает значение, соответствующее минимальной длительности импульса (см. рис. 1), в $(45–55)^{1/2}$ раз, т. е. достигает 25–35 м.

В бортовых системах ближней локации для расширения рабочего диапазона относительных скоростей должна быть предусмотрена возможность повышения частоты следования коротких излучаемых сигналов в быстротеменяющейся ситуации на малом расстоянии до объекта. При переходе к наносекундным импульсам частота следования f_c может достигать десятков кило-

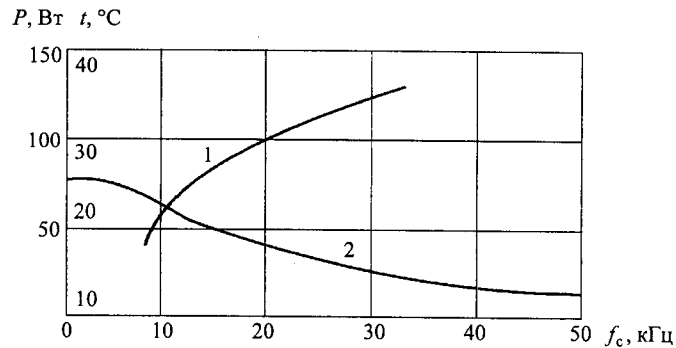


Рис. 4. Зависимость температуры корпуса (кривая 1) и излучаемой мощности (кривая 2) инжекционного излучателя ИЛПИ-102 от частоты следования импульсов: $\tau = 20$ нс, ток накачки $I_H = 12$ А

герц без увеличения средней мощности и габаритных размеров лазерного передатчика. В результате обеспечивается быстроедействие системы, т. е. накопление достаточного количества импульсов и достоверное обнаружение при малом времени взаимодействия с объектом.

Энергетические параметры инжекционных лазеров зависят от частоты следования и длительности импульсов. Результаты экспериментальных исследований приведены на рис. 4, 5 и доказывают способность ИЛ работать с частотой $f_c = 30-50$ кГц. В качестве генератора накачки использовалась схема на основе мощного транзисторного ключа (КТ926), импульсы которого формируются затем по длительности и амплитуде (20–30 А) GaAs-импульсным лавинным диодом [1].

Не менее актуальна проблема повышения помехоустойчивости лазерных систем в условиях замутненной атмосферы (облачность, осадки, туман, дым). Сокращение длительности излучаемых сигналов также снижает уровень мощности, рассеиваемой аэрозольными образованиями в обратном направлении. В ряде случаев излучение импульсов переменной длительности дает дополнительные возможности по селекции полезных сигналов при наличии пассивных помех [6].

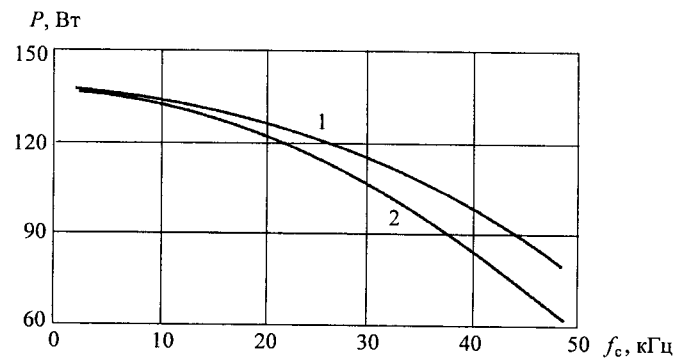


Рис. 5. Зависимость мощности лазера ИЛПИ-110 от частоты следования импульсов при $I_H = 12$ А: кривая 1 – $\tau = 5$; 2 – 20 нс

Проведенные исследования позволяют реализовать автоматические системы обнаружения с широким диапазоном измеряемых расстояний и относительных скоростей. При значительном расстоянии до объекта излучаются импульсы с типовыми параметрами ($\tau = 100\text{--}200$ нс, $f_c = 3\text{--}5$ кГц), фотоприемник имеет сравнительно узкую полосу пропускания. За счет этого достигается заданная дальность действия малогабаритных оптоэлектронных систем ближней локации с инжекционными лазерами. По мере сближения с отражающей поверхностью длительность импульсов сокращается до $\tau = 2\text{--}5$ нс, сопротивление нагрузки фотодиода может быть уменьшено для обеспечения квазиоптимальной полосы пропускания ФПУ. В результате достигается высокая разрешающая способность СБЛ $\Delta r = c\tau/2$ (c – скорость света).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Легкий В. Н., Миценко И. Д., Галун Б. В. Малогабаритные генераторы накачки полупроводниковых лазеров. Томск: Радио и связь, 1990.
2. Легкий В. Н., Миценко И. Д. Влияние формы и длительности огибающей световой вспышки на чувствительность инерционного фотоприемного устройства с лавинным фотодиодом // Радиотехника и электроника. 1984. XXIX, № 2. С. 365.
3. Шестов Н. С. Выделение оптических сигналов на фоне случайных помех. М.: Сов. радио, 1967.
4. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М.: Сов. радио, 1966.
5. Легкий В. Н., Галун Б. В. Элементы и устройства систем ближней локации. Новосибирск: НГТУ, 2001.
6. Легкий В. Н., Топорков В. Д. Оптоэлектронные автономные системы ближней локации. Новосибирск: НГТУ, 2002.

*Новосибирский государственный
технический университет,
E-mail: LVN@ignis.cs.nstu.ru*

*Поступило в редакцию
20 июня 2002 г.*