

06; 07

СТАБИЛИЗАЦИЯ АМПЛИТУДЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРНЫХ ДИОДОВ

В. Н. Королев, А. В. Маругин, А. В. Харчев, В. Б. Цареградский

Рассмотрены два способа стабилизации интенсивности излучения инжекционных лазеров: с помощью внешнего электрооптического элемента и непосредственно по цепи питания излучателя. Экспериментально реализована стабилизация амплитуды излучения серийных лазерных диодов с помощью внешнего модулятора на основе кристалла из метаниобата лития, позволившая снизить амплитудные НЧ флуктуации на 25—30 дБ. Показано, что такая схема стабилизации является эффективной при условии линейной поляризации излучения лазерного диода в широком диапазоне значений мощности излучения и в полосе частот до 10^5 Гц.

Эффективность практических применений полупроводниковых лазерных излучателей во многом зависит от уровня амплитудных шумов излучения. Для ряда приложений инжекционных лазеров (ИЛ) в оптической связи и метрологии особый интерес представляют характеристики излучателей в области низких радиочастот, где, как известно, амплитудный шум ИЛ имеет фликкерный характер, причем значения спектральной плотности мощности шума достаточно высоки по сравнению с другими типами лазеров [$1-4$]. В связи с этим возникает задача разработки способов стабилизации интенсивности излучения ИЛ. Наряду с мерами по пассивной стабилизации путем уменьшения флуктуаций тока накачки и рабочей температуры диодных излучателей целесообразно использование активных систем стабилизации интенсивности излучения. Наиболее простой способ активной стабилизации амплитуды оптического сигнала заключается в подаче сигнала обратной связи в ток питания диода, что позволяет управлять характеристиками излучения, в том числе и флуктуационными, с характерными временами 10^{-8} — 10^{-9} с. Однако управление током питания влияет не только на амплитуду излучения, но и приводит к смещению частоты излучения с результирующим коэффициентом ~ 1 ГГц/мА.

Исследование взаимосвязи флуктуаций интенсивности и частоты излучения ИЛ показало, что коэффициент корреляции шумов этих параметров в низкочастотном диапазоне зависит от уровня накачки и колеблется в пределах 0,2—0,8 [$3, 5$]. Вследствие этого стабилизация одного из этих параметров излучения может приводить к увеличению уровня флуктуаций другого [5]. В связи с этим в тех задачах, где одновременно необходима стабилизация амплитуды и частоты генерации, возникает необходимость разделения цепей управления мощностью и частотой излучения. Наиболее просто это осуществить стабилизируя частоту генерации путем управления величиной тока накачки, а для стабилизации интенсивности использовать какой-либо внешний элемент, например электрооптический модулятор [6]. В данной работе исследованы два варианта системы стабилизации интенсивности излучения полупроводниковых лазерных диодов: путем управления током питания и с помощью внешнего электрооптического модулятора, а также проанализированы сильные и слабые стороны каждого из этих способов.

Рассмотрим линейную модель, описывающую систему стабилизации интенсивности излучения. Будем считать, что флуктуации мощности ИЛ можно пред-

ставить в виде суммы двух нескоррелированных процессов: «модуляционной» части, определяемой наличием шума тока накачки $n_i(t)$, и «внутреннего» шума мощности лазерного излучения $n_p(t)$. Справедливость такого подхода подтверждается данными экспериментальных исследований [7].

Остановимся сначала на случае, когда сигнал ошибки подается в цепь питания и управляет величиной тока накачки. Эквивалентная схема такой системы представлена на рис. 1. Ее можно описать с помощью замкнутой системы уравнений

$$P = p(i) + n_p, \quad e = -(\alpha P - v_{он}) + n_{ан}, \quad i = Ceg(v_0) + i_0 + n_i. \quad (1)$$

Здесь i и P — мгновенные значения тока ИЛ и мощности излучения; i_0 и v_0 — соответственно ток питания и напряжение на диоде в рабочей точке; C — коэффициент усиления цепи обратной связи, g — дифференциальная проводимость диода; α — коэффициент преобразования фотоприемного тракта; $v_{он}$ — опорное напряжение усилителя в цепи обратной связи; n_p , n_i и $n_{ан}$ — источники шума (лазерный шум, шум тока питания и радиотехнический шум цепи обрат-

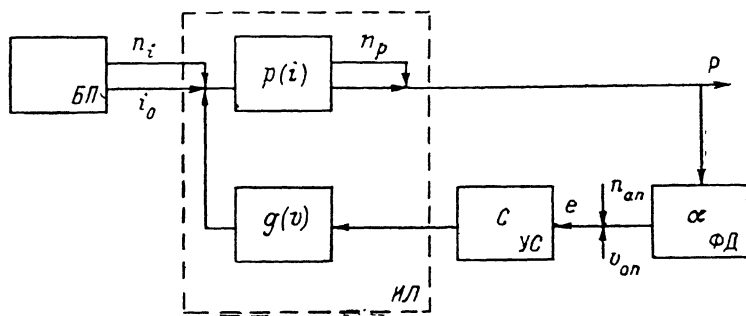


Рис. 1. Блок-схема инжекционного лазера с системой амплитудной стабилизации по цепи питания.

БП — блок питания, ИЛ — инжекционный лазер, УС — усилитель обратной связи, ФД — фотодетектор.

ной связи соответственно). Линеаризовав выходную характеристику лазера $p(i)$ в рабочей точке и приняв для простоты $v_{он} = \alpha P_0 = aki_0$, $g_0 = g(v_0)$, получаем для мгновенных значений флуктуаций мощности

$$\delta P = \frac{1}{1 + kCg_0\alpha} (kCg_0n_{ан} + \delta P_0). \quad (2)$$

Здесь δP_0 — флуктуации мощности излучателя в свободном режиме, т. е. при отсутствии обратной связи ($C=0$): $\delta P_0 = kn_i + n_p$.

Рассмотрим стабилизацию излучения с помощью внешнего управляющего элемента (рис. 2). Такая система описывается системой уравнений, аналогичной (1),

$$P = (p(i) + n_p)(M(v) + n_M), \quad i = i_0 + n_i, \quad v = v_0 + Ce, \quad e = -(\alpha P - v_{он}) + n_{ан}, \quad (3)$$

где $M(v)$ — коэффициент пропускания по мощности внешнего оптического элемента, зависящий от приложенного напряжения v , а n_M — внутренние флуктуации этого коэффициента.

После линеаризации в точке (i_0, v_0) , введя обозначения $B = (dM/dv)|_{v=v_0}$, $P_0^* = p(i_0)M_0$ и $v_{он} = P_0\alpha$, имеем для флуктуаций мощности излучения в системе с внешним элементом

$$\delta P^* = \frac{1}{1 + p(i_0)BC\alpha} (p(i_0)BCn_{ан} + \delta P_0^*), \quad (4)$$

где

$$\delta P_0^* = \delta P^*(C=0) = M_0\delta P_0 + p(i_0)n_M$$

(будем обозначать звездочкой характеристики схемы с внешним управляющим элементом).

Перейдем к спектральной форме полученных выражений с помощью Фурье-преобразований. Считая все источники шума нескоррелированными и исходя из (3) и (4), получаем следующие выражения для спектральной плотности мощности флуктуаций интенсивности излучения:

$$S_p(f) = \frac{1}{(1 + \alpha C k g_0)^2} [k^2 g_0^2 C^2 S_{a1}(f) + S_{p_0}(f)], \quad (5)$$

$$S_{p_0^*}(f) = \frac{1}{(1 + \alpha C B p(i_0))^2} [p^2(i_0) B^2 C^2 S_{a1}(f) + S_{p_0^*}(f)], \quad (6)$$

где

$$S_{p_0}(f) = k^2 S_{n_i}(f) + S_{n_p}(f),$$

$$S_{p_0^*}(f) = M_0^2 S_{p_0}(f) + p^2(i_0) S_{n_M}(f).$$

Нами была экспериментально получена и исследована стабилизация интенсивности излучения отечественных ИЛ по цепи питания и внешним электроопти-

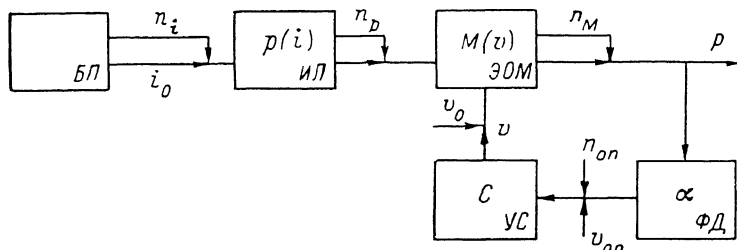


Рис. 2. Блок-схема инжекционного лазера с внешней системой стабилизации.

БП — блок питания, ИЛ — инжекционный лазер, ЭОМ — электрооптический модулятор, УС — усилитель обратной связи, ФД — фотодетектор.

ческим элементом. Особое внимание уделялось изучению эффективности стабилизации мощности излучения с помощью электрооптического модулятора, так как этот метод к настоящему моменту для полупроводниковых излучателей не применялся, а практическая реализация управления с помощью модуляторов оптическими характеристиками других типов лазеров [6] имеет существенные отличия из-за специфических особенностей ИЛ (поляризационные свойства излучения, уровень амплитудных флуктуаций, структуры оптического пучка и т. д.). Все же, как отмечалось выше, такая схема позволяет одновременное осуществление частотной стабилизации активными методами по цепи питания, что является важным достоинством для ряда практических применений излучателей.

Эксперименты проводились с полупроводниковыми лазерными диодами на основе ДГС $Al_xGa_{1-x}As$, работающими в непрерывном режиме при комнатной температуре. Фотоприемниками служили кремниевые фотодиоды ФД-24К (чувствительность $\beta \approx 0.5$ А/Вт, сопротивления нагрузки $R_n = 1$ кОм). В цепи обратной связи использовался набор усилителей низкой частоты с малозумящим входным каскадом (коэффициент усиления до 130 дБ, эквивалентное входное шумовое сопротивление $R_{ш} = 4$ Ом). В качестве внешнего элемента с управляемым коэффициентом пропускания использовался электрооптический модулятор мощности излучения на $LiNbO_3$. Следует отметить, что эффективность работы модулятора во многом определяется уровнем оптического поглощения в элементах схемы. Однако существуют определенные трудности в подборе поляризаторов, работающих в ИК диапазоне и имеющих одновременно слабое поглощение. Поэтому, учитывая, что выше порога генерации поляризация излучения ИЛ близка к линейной, в условиях нашего эксперимента оказалось целесообразным отказаться в схеме модулятора от традиционного входного поляризатора, что позволило существенно упростить установку и уменьшить оптические потери. Для использованного модулятора коэффициент пропускания

$M \sim \cos^2 [m(v-v_0)]$, где коэффициент пропорциональности $m \approx 8 \cdot 10^{-4} \text{ В}^{-1}$. Для экспериментального излучения флуктуационных характеристик излучения в диапазоне $10-10^5$ Гц использовалась измерительная система на основе селективного микрольтметра с предусилителем, имевшая чувствительность на уровне тепловых шумов. Все результаты приводились к единичной полосе радиочастот. Характерные значения параметров элементов использованной системы приведены ниже.

α	g_0	B	M_0	k
500 В/Вт	0.35 Ом ⁻¹	$1.2 \cdot 10^{-4} \text{ В}^{-1}$	0.24	0.1 А/Вт

В общем случае параметры α и C зависят от частоты, но использованные в нашей схеме элементы позволяли считать эти коэффициенты постоянными для частот от 10 до 10^5 Гц, т. е. во всем спектральном диапазоне измерений.

Перейдем к анализу полученных соотношений. Наиболее интересным является режим стабилизации при больших значениях коэффициента обратной связи C . Критерием эффективной стабилизации для $S_p(f)$ и $S_{p^*}(f)$ могут служить условия

$$C > \frac{1}{\alpha k g_0} \quad \text{и} \quad C^* > \frac{1}{\alpha B p(i_0)} \quad (7)$$

соответственно. При подстановке значений параметров получаем для коэффициента усиления C соответственно $6 \cdot 10^{-2}$ и $3 \cdot 10^3$. Таким образом, управление интенсивностью излучения по цепи питания можно осуществить даже при незначительной величине обратной связи. В условиях приближений (7) результирующие спектры шума интенсивности излучения (5), (6) преобразуются к виду

$$S_p(f) = \frac{S_{\text{ан}}(f)}{\alpha^2} + \frac{S_{p_0}(f)}{\alpha^2 C^2 k^2 g_0^2}, \quad (8)$$

$$S_{p^*}(f) = \frac{S_{\text{ан}}(f)}{\alpha^2} + \frac{S_{p_0^*}(f)}{\alpha^2 C^2 B^2 p^2(i_0)}. \quad (9)$$

Очевидно, что с увеличением обратной связи спектральная плотность абсолютного уровня флуктуаций мощности излучения стремится в обоих случаях к пределу $S_{\text{ан}}/\alpha^2$, полностью определяемому шумовыми свойствами входных каскадов цепи обратной связи. Но, поскольку для управления электрооптическим кристаллом требуются значительно более высокие напряжения, чем в цепи питания излучателя, оптимальные коэффициенты $C^{\text{опт}} = C(S_p \rightarrow S_{\text{ан}}/\alpha^2)$ в этих двух случаях отличаются почти на 5 порядков (см. (7)). Следует отметить, что в реальных системах определяющим для $S_{\text{ан}}(f)$ может стать дробовой шум тока фотодетектора со спектральной плотностью $S_{\text{ан}}^{\text{др}}(f) = 2qP_0 \alpha R_p$. Тогда для выходной мощности лазера $p(i_0) = 5$ мВт плотность дробовых флуктуаций будет иметь величины $S_{\text{ан}}^{\text{др}} = 8 \cdot 10^{-16} \text{ В}^2/\text{Гц}$ и $S_{\text{ан}}^{\text{др}*} = 2 \cdot 10^{-16} \text{ В}^2/\text{Гц}$. Тем не менее использованная система обратной связи имела при разных C приведенный по входу уровень шума в пределах $S_{\text{ан}} \approx 1-8 \cdot 10^{-17} \text{ В}^2/\text{Гц}$. Таким образом, нижним пределом уровня флуктуаций интенсивности излучения, определяющим эффективность стабилизации, становится дробовой шум фотодетектора, некоррелированный с флуктуационными характеристиками излучателя.

На рис. 3 представлены расчетные кривые (5) и (6), характеризующие спектральную плотность флуктуаций интенсивности излучения стабилизируемого излучателя на частоте $f = 1$ кГц при выходе излучения $p(i_0) = 5$ мВт. Значения $S_{\text{ан}}$, S_{p_0} и $S_{p_0^*}$ (1 кГц) взяты из экспериментальных данных, полученных на исследованных образцах. Из графиков видно, что оба способа стабилизации интенсивности излучения позволяют снизить уровень флуктуаций на 30-

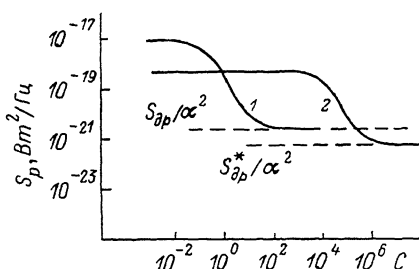


Рис. 3. Расчетная зависимость абсолютного уровня флуктуаций интенсивности излучения стабилизированного ИЛ (S) от коэффициента обратной связи (C) для случаев электрической (1) и электрооптической обратной связи.

1, 2 — электрическая и электрооптическая обратные связи соответственно.

40 дБ в зависимости от первоначального значения шума излучения $S_{p_0}(f)$. Нижний предел спектральной плотности флуктуаций для токов накачки, превышающих пороговое значение (т. е. при $p(i_0) \geq 1$ мВт), определяется уровнем дробовых шумов фотодетектора в цепи обратной связи, который растет пропорционально мощности излучения P_0 . Отличие начальных уровней шума S_p и S_{p^*}

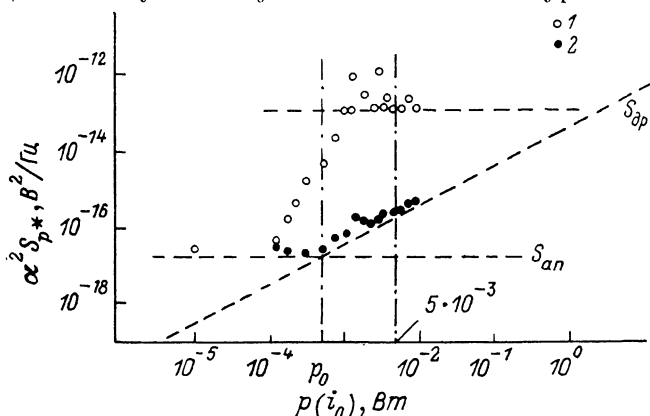


Рис. 4. Зависимость спектральной плотности мощности флуктуаций на частоте $f=1$ кГц на выходе фотодетектора от уровня выходной мощности излучателя.

1 — нестабилизированный источник излучения, 2 — стабилизированный ЭО-модулятором с коэффициентом обратной связи $C=5 \cdot 10^6$. p_0 — мощность излучения, соответствующая порогу генерации.

объясняется тем, что эти характеристики приведены к одной точке по току излучателя (т. е. по мощности $p(i_0)$), а оптические потери, а значит, и значения P_0 и P_0^* в разных схемах отличаются примерно в 4 раза. При расчете зависимостей, представленных на рис. 3, в качестве исходных данных были взяты средние значения уровня амплитудных флуктуаций, присущих исследованным ИЛ.

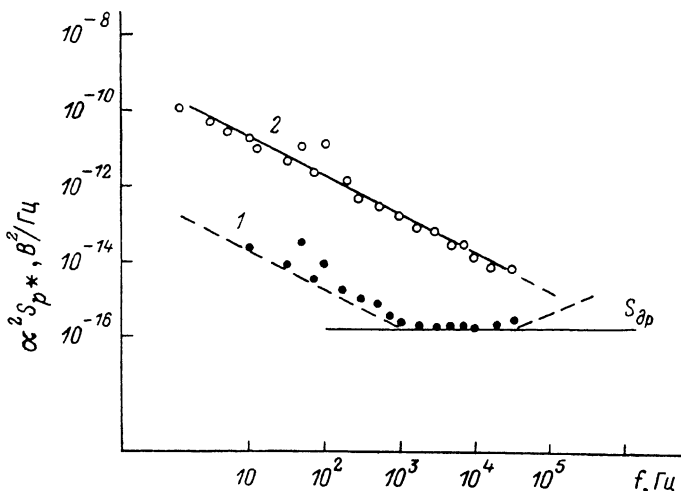


Рис. 5. Спектральная зависимость мощности флуктуаций интенсивности излучения ИЛ (сигнал на выходе фотодетектора) со стабилизацией ЭО-модулятором (1) и без нее (2).

$C=2 \cdot 10^5$, $p(i_0)=5$ мВт.

При наличии излучателей с повышенным или пониженным уровнем шума наклонный участок характеристик смещается соответственно вправо или влево по горизонтальной оси, а предельные характеристики сохраняются неизменными, поскольку определяются только постоянным уровнем мощности излучения. Зависимость спектральной плотности мощности флуктуаций на фотодетекторе $\alpha^2 S_{p^*}$ (1 кГц) от режима работы излучателя показана на рис. 4. На этом рисунке экспериментальные результаты характеризуют абсолютный уровень флуктуаций сигнала на фотодетекторе в свободном режиме генерации и при ста-

билизации излучения электрооптическим модулятором с коэффициентом $C^* = = 5 \cdot 10^5$. Штриховыми линиями отмечены предельные значения уровня шума (шум аппаратуры и дробовой шум фотодетектора), а также средний уровень амплитудного шума, присущий ИЛ в режиме развитой генерации. Видно, что внешняя стабилизация интенсивности излучения становится эффективной в области, примыкающей к порогу генерации ($p(i_0) \approx 0.2 - 0.5$ мВт). Такая особенность связана с достаточно резким изменением степени поляризации излучения при переходе лазера через порог. Отсутствие ярко выраженной линейной поляризации при накачке ниже пороговой приводит к ухудшению характеристик модулятора (снижается значение круговизны характеристик пропускания) и затрудняет стабилизацию. При дальнейшем уменьшении тока питания поляризация лазерного излучения становится близкой к круговой, в результате чего управляющий сигнал на электрооптическом кристалле перестает быть скоррелированным с флуктуациями излучения ИЛ. Зависимости на рис. 4 свидетельствуют также о том, что относительно медленное нарастание дробового шума фотоприемника с ростом мощности $p(i_0)$ не ограничивает диапазон стабилизации до значений ~ 100 мВт, что является вполне достаточным, так как значительно превышает рабочий диапазон существующих в настоящее время серийных ИЛ.

Остановимся теперь более подробно на спектральных особенностях флуктуационных характеристик излучения. На рис. 5 показана спектральная зависимость мощности амплитудных флуктуаций излучения в рабочей точке $p(i_0) = = 5$ мВт. В режиме свободной генерации спектр мощности флуктуаций интенсивности излучения S_{p_0} имеет обычный для ИЛ фликкерный характер $S(f) \sim \sim 1/f^\gamma$, где $\gamma \approx 1$. Аналогичный вид имеет спектр шума стабилизированного излучателя в диапазоне $10 - 10^3$ Гц. В диапазоне $1 - 30$ кГц уровень шума, стабилизированного модулятором ИЛ, определяется дробовыми флуктуациями фотодетектора и практически не зависит от частоты. Таким образом, при выбранных значениях C и $p(i_0)$ в диапазоне $10 - 10^4$ Гц осуществлена стабилизация интенсивности излучения с пониженным уровнем флуктуаций на $25 - 30$ дБ. Экспериментальные точки находятся в хорошем соответствии с рассчитанной для $C^* = 2 \cdot 10^5$ зависимостью (штриховые линии). На частотах $f \geq 10^5$ Гц внешняя электрооптическая стабилизация становится неэффективной. Подъем расчетной характеристики связан с учетом уменьшения на этих частотах коэффициента пропускания фотодетектора $\alpha(f)$. Затрудняется и создание безынерционной обратной связи для сигнала управления. Основной причиной этого является радиотехническая инерционность электрооптического кристалла. Однако эти препятствия не являются принципиально неустранимыми. За счет подбора совершенных усилителей, менее инерционного кристалла и уменьшением постоянной времени фотодетектора можно значительно расширить частотный диапазон, в пределах которого использованная схема будет работоспособной.

При стабилизации излучателя по цепи питания в условиях режима работы излучателя, аналогичного приведенному на рис. 5 ($P_0 \approx 1.3$ мВт), удается снизить уровень флуктуаций излучения на величину $30 - 35$ дБ ($C = 5$) в полосе $1 - 10^3$ Гц. Дальнейшей стабилизации препятствует наличие дробового шума фотодетектора ($S^{np} = 2 \cdot 10^{-16}$ В²/Гц). Таким образом, оба метода стабилизации позволяют осуществить стабилизацию интенсивности излучения на величину до 35 дБ, практически до уровня дробовых шумов. При этом значения коэффициентов обратной связи C и C^* отличаются на $4 - 5$ порядков, однако предельные характеристики систем одинаковы. Целесообразность применения конкретного метода стабилизации определяется требованиями на другие излучательные характеристики.

В заключение сформулируем основные результаты, полученные в данной работе. На основе линейной модели рассмотрена система стабилизации амплитуды излучения ИЛ в двух вариантах: с управлением по цепи питания излучателя и с помощью внешнего модулятора. Разработана и осуществлена стабилизация интенсивности излучения ИЛ с помощью электрооптического модулятора на основе кристалла метаниобата лития. В результате эксперимента получены результаты, подтверждающие расчетные характеристики и показывающие, что примененная схема снижает уровень амплитудных шумов излучения

на 25—30 дБ, т. е. практически до предела, определенного уровнем дробовых шумов фотодетектора в цепи обратной связи. На основе сравнительного анализа разных способов стабилизации показано, что стабилизация внешними элементами является эффективной для линейной поляризации излучения и может быть с успехом использована в системах, требующих одновременной стабилизации амплитуды и частоты генерации излучателя.

Список литературы

- [1] *Tenchio G.* // *Electron. Lett.* 1977. Vol. 13. N 20. P. 614—615.
- [2] *Dandridge A., Tveten A. B., Miles R. O., Gialloranzi T. G.* // *Appl. Phys. Lett.* 1980. Vol. 37. N 6. P. 526—528.
- [3] *Dandridge A., Taylor H. F.* // *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques.* 1982. Vol. MTT-30. N 10. P. 1726—1738.
- [4] *Маругин А. В., Харчев А. В.* // *Техника средств связи. Сер. РИТ.* 1986. Вып. 1. С. 77—80.
- [5] *Tsuchida H., Taho T.* // *Jap. J. Appl. Phys.* 1983. Vol. 22. N 7. P. 1152—1156.
- [6] *Robertson N. A., Hoggan S., Mangan J., Hough J.* // *Appl. Phys.* 1986. Vol. B 39. N 3. P. 149—153.
- [7] *Маругин А. В., Харчев А. В.* // *ЖТФ.* 1987. Т. 57. Вып. 12. С. 2380—2382.

Горьковский государственный университет
им. Н. И. Лобачевского

Поступило в Редакцию
8 апреля 1988 г.
В окончательной редакции
31 августа 1988 г.