

Статистический подход при планировании эксперимента для лазера на парах бромида меди

И.П.Илиев, С.Г.Гочева-Илиева, Д.Н.Астаджов, Н.П.Денев, Н.В.Саботинов

С целью улучшения планирования эксперимента проведен статистический анализ большого объема экспериментальных данных для лазера на бромиде меди с длинами волн 510.6 и 578.2 нм. Исследовано влияние десяти основных входных лазерных параметров на выходную мощность лазера с помощью различных статистических методов, таких как факторный анализ, метод главных компонент, множественная регрессия и другие. Установлено, что наибольшее влияние оказывают внутренний диаметр лазерной трубки, диаметр внутренних колец, длина активной области и входная электрическая мощность.

Ключевые слова: лазер на бромиде меди, факторный анализ, метод главных компонент, множественная регрессия.

1. Введение

Хотя лазеры на парах меди считаются хорошо изученными, их экспериментальные исследования по-прежнему вызывают большой интерес, что обусловлено широтой применения этих лазеров. В последние годы внимание ученых направлено на лазеры с активными средами на основе галогенидов меди, смешанных с H_2 , HCl , HBr и другими добавками [1–6], позволяющими увеличить энергию импульсов и частоту их следования, а также улучшить качество лазерного пучка.

В результате исследований накоплено большое количество экспериментального материала, который до настоящего времени не подвергался качественному и статистическому анализу. В этом плане следует упомянуть краткую работу [7], в которой влияние основных входных параметров на эффективность лазера на парах бромида меди оценивается на примере небольшого, но наглядного набора данных.

На выходные характеристики лазера (выходную лазерную мощность, эффективность и т. д.) оказывает влияние целый ряд независимых переменных. Условно их можно разделить на четыре группы: 1 – геометрические параметры (длина и диаметр лазерной трубки, расстояние между электродами); 2 – энергетические характеристики (входная электрическая мощность, частота следования импульсов, длительность импульса, крутизна фронта импульса); 3 – термодинамические характеристики (давление буферного газа, давление добавок, температура резервуара с галогенидом меди, температурная изоляция активного объема) и 4 – оптические характеристики (тип резонатора, технология изготовления зеркал). На практике экспериментально определить комплексное влияние всех факторов на выходные характеристики лазера невозможно, поэтому основной задачей в случае исследования лазеров подобного типа является планирование эксперимента. При планировании необходимо подобрать такие условия и правила проведения экспериментов, которые обеспечат получение надежной и достоверной информации об объекте исследования при наименьших лабораторных затратах, а также позволят представить полученную информацию в компактной и доступной форме с количественной оценкой точности [8–10].

Вот некоторые из основных вариантов планирования, использованных на различных стадиях этого исследования [8–10]: 1) планирование выборочного эксперимента – его суть заключается в выборе из всех кумулятивных факторов группы наиболее значимых для их дальнейших детальных исследований; 2) планирование оптимизационного эксперимента, основной целью которого является оптимизация исследуемого объекта; 3) планирование регрессионного эксперимента, позволяющее получать регрессионные модели (полиномиальные и др.).

Наиболее часто для решения поставленных задач применяют два основных метода – структурный и феноменологический. При структурном подходе создается модельная структура среды, состоящей из огромного количества частиц – электронов, положительных и отрицательных ионов, нейтральных атомов. Исходные параметры лазера представляются как суммарный результат внутреннего перемещения и взаимодействия этих частиц. В библиографии [11–15] представлены компьютерные и аналитические модели и методы анализа, при помощи которых на практике адекватно решаются частные задачи, связанные с планированием эксперимента. При феноменологическом подходе структура лазерной среды не учитывается и для планирования эксперимента исполь-

Перевод с англ. В.В.Кошечкиной.

I.P.Iliev. Department of Physics, Technical University, Plovdiv, 25 Tzanko Dzhustabanov St., 4000 Plovdiv, Bulgaria; www.tu-plovdiv.bg, e-mail: iliev55@abv.bg

S.G.Gочева-Илиева. Department of Applied Mathematics and Modelling, Faculty of Mathematics and Informatics, Paisii Hilendarski University of Plovdiv, 24 Tzar Assen St., 4000 Plovdiv, Bulgaria; www.fmi-plovdiv.org, e-mail: snow@pu.acad.bg, snegocheva@yahoo.com

D.N.Astadjov, N.P.Denev, N.V.Sabotinov. Metal Vapour Lasers Department, Georgi Nadjakov Institute of Solid State Physics, Bulgarian Academy of Sciences, 72 Tzarigradsko Chaussee, 1784 Sofia, Bulgaria; www.issp.bas.bg/lab/LabMVLs, e-mail: asta55@abv.bg, ndenevtp@dir.bg, nsabotinov@issp.bas.bg

Поступила в редакцию 9 августа 2007 г.

зуются только экспериментальные данные. При обработке результатов применяются статистические методы – факторный анализ, регрессионный анализ, кластерный анализ и т. д. Публикации, в которых при планировании эксперимента для лазеров на парах меди использовался бы статистический анализ, авторам неизвестны.

Предметом исследования настоящей работы является лазер на парах бромида меди с длинами волн $\lambda_1 = 510.6$ нм и $\lambda_2 = 578.2$ нм.

Нами представлены основные результаты всестороннего статистического исследования, в основе которого лежит обширный объем экспериментальных результатов, полученных в Департаменте лазеров на парах металлов (Институт физики твердого тела им. Георгия Наджакова, Болгарская академия наук, София) в последние два десятилетия и опубликованных в [16–25]. При проведении исследования с помощью методов математической статистики решались следующие задачи: 1) определение входных параметров лазера, влияющих на выходную мощность; 2) классификация параметров по признаку наличия или отсутствия корреляции с другими параметрами в группе; 3) определение границ влияния сгруппированных переменных на выходную мощность; 4) получение линейной модели этого влияния; 5) интерпретация и объяснение результатов наиболее важных физических процессов, влияющих на мощность лазерной системы; 6) планирование эксперимента согласно полученным данным.

Исследование было проведено при помощи пакета программ статистического анализа SPSS [26].

2. Факторный анализ

Статистический метод факторного анализа предназначен для преобразования набора взаимосвязанных переменных в новый набор некоррелированных компонентов, или факторов, отвечающих за большинство изменений в наборе данных. Этот подход позволяет сгруппировать входные лазерные характеристики в независимых факторах и классифицировать их взаимозависимость в пределах групп. После получения новых независимых переменных (факторов), для установления степени их влияния на выходные лазерные характеристики можно использовать другие статистические подходы, такие как регрессионный анализ с несколькими переменными и анализ невязок.

В работе исследуются одиннадцать параметров, которые описывают функциональные зависимости лазера на парах CuBr. Используются следующие десять независимых начальных переменных: D – внутренний диаметр лазерной трубки, d_r – внутренний диаметр колец, L – длина активной области (расстояние между электродами), P_{in} – входная электрическая мощность, P_L – удельная входная электрическая мощность, f – частота следования импульсов, p_{Ne} – давление неона, p_{H_2} – давление водорода, C – эквивалентная емкость блока конденсаторов, T_r – температура резервуаров CuBr. Основная зависимая переменная – выходная мощность лазера P_{out} . Эти переменные могут быть также обозначены как x_i ($i = 1, 2, \dots, 11$).

В проводимом исследовании использовались результаты более чем 300 экспериментов из работ [16–25]. Множество случайных образцов было тщательно изучено на предмет строгих требований адекватности исполь-

зованных статистических подходов. Здесь представлены некоторые наиболее наглядные результаты, полученные в 157 экспериментах для указанных выше 11 переменных.

Обозначим через x_{ij} значения переменной x_i в j -м эксперименте ($j = 1, 2, \dots, 157$). Перед проведением любого статистического анализа можно вычислить стандартизованные значения \hat{x}_i для любого j по формуле $\hat{x}_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_i) / \sigma_i$, где \bar{x}_i и σ_i – главное значение и стандартное отклонение x_i соответственно.

При факторном анализе набор из p переменных необходимо уменьшить до набора из m элементов ($m < p$), где m – это количество факторов, из которых производится последующий отбор. Каждый фактор представляется в виде суммы p переменных. Таким образом, i -й фактор имеет вид

$$F_i = w_{i1}\hat{x}_1 + w_{i2}\hat{x}_2 + \dots + w_{ip}\hat{x}_p, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

Можно также представить каждую переменную p как линейную комбинацию m факторов,

$$\hat{x}_k = a_{1k}F_1 + a_{2k}F_2 + \dots + a_{mk}F_m + E_k, \quad k = 1, 2, \dots, p, \quad (2)$$

где E_k – невязка, которую нельзя выразить через факторы и которую можно рассматривать как слагаемое погрешности.

Для проведения факторного анализа, или анализа главных компонентов, необходимо получить матрицу коэффициентов корреляции для изучения взаимосвязей между лазерными параметрами в полученном наборе данных. В верхней половине табл. 1 показаны корреляционные коэффициенты, в нижней – соответствующие уровни значимости. Обнаружено, что только первые шесть переменных (D, d_r, L, P_{in}, P_L и p_{H_2}) сильно коррелируют с выходной мощностью P_{out} . Абсолютные значения корреляционных коэффициентов для остальных четырех параметров меньше 0.3, и уровень значимости T_r неприемлем ($0.352 > \alpha = 0.05$). Это означает, что эти четыре переменные не следует использовать в последующем факторном анализе.

Вначале необходимо проверить, удовлетворяют ли данные для первых шести параметров критериям применимости факторного анализа. Было вычислено, что коэффициент адекватности Кайзера – Мейера – Олкина равен 0.681 (этот показатель должен находиться между 0.5 и 1), и значимость теста Бартли на сферичность (Sig.) составляет 0.000. Отметим, что соответствующие значения этих стандартных статистических показателей для всех данных составляют 0.600 и 0 соответственно, что свидетельствует о применимости факторного анализа в любом случае.

Следующим важным шагом является принятие решения о том, сколько компонентов, или факторов, следует оставить и перенести из p коррелированных переменных в m некоррелированных компонентов. При помощи метода главных компонентов были извлечены все компоненты, из которых мы выбрали три фактора, т. е. три первых собственных значения, которые отвечают за 92.99 % всех изменений набора данных (подробнее см. табл. 2).

Далее проводится извлечение факторов с помощью метода главных компонентов и метода ротации Varimax. Результирующая повернутая матрица компонентов (известная также как матрица загрузки) приведена в табл. 3. Для большей наглядности коэффициенты корреляции

Табл.1. Матрица коэффициентов корреляции всех наблюдавшихся начальных лазерных параметров (определитель равен 4.96E-006).

		<i>D</i> (мм)	<i>d_r</i> (мм)	<i>L</i> (см)	<i>P_{in}</i> (кВт)	<i>P_L</i> (кВт/м)	<i>p_{H₂}</i> (Тор)	<i>f</i> (кГц)	<i>p_{Ne}</i> (Тор)	<i>C</i> (пФ)	<i>T_r</i> (°C)	<i>P_{out}</i> (Вт)
Корреляция	<i>D</i>	1.00	.852	.688	.633	-.559	.257	-.056	-.244	.396	.082	.655
	<i>d_r</i>	.852	1.00	.904	.849	-.543	.350	-.134	-.194	.341	.181	.881
	<i>L</i>	.688	.904	1.00	.858	-.713	.510	-.168	-.131	.217	.077	.913
	<i>P_{in}</i>	.633	.849	.858	1.00	-.330	.362	-.143	-.099	.302	.072	.954
	<i>P_L</i>	-.559	-.543	-.713	-.330	1.00	-.444	.142	.320	-.190	.004	-.452
	<i>p_{H₂}</i>	.257	.350	.510	.362	-.444	1.00	-.155	-.062	-.081	-.281	.451
	<i>f</i>	-.056	-.134	-.168	-.143	.142	-.155	1.00	.491	-.083	.061	-.184
	<i>p_{Ne}</i>	-.244	-.194	-.131	-.099	.320	-.062	.491	1.00	-.315	.023	-.137
	<i>C</i>	.396	.341	.217	.302	-.190	-.081	-.083	-.315	1.00	.224	.235
	<i>T_r</i>	.082	.181	.077	.072	.004	-.281	.061	.023	.224	1.00	.031
	<i>P_{out}</i>	.655	.881	.913	.954	-.452	.451	-.184	-.137	.235	.031	1.00
Sig. (1-ограниченный)	<i>D</i>		.000	.000	.000	.000	.001	.247	.001	.000	.159	.000
	<i>d_r</i>	.000		.000	.000	.000	.000	.051	.009	.000	.013	.000
	<i>L</i>	.000	.000		.000	.000	.000	.020	.055	.004	.174	.000
	<i>P_{in}</i>	.000	.000	.000		.000	.000	.041	.115	.000	.192	.000
	<i>P_L</i>	.000	.000	.000	.000		.000	.041	.000	.010	.481	.000
	<i>p_{H₂}</i>	.001	.000	.000	.000	.000		.029	.224	.161	.000	.000
	<i>f</i>	.247	.051	.020	.041	.041	.029		.000	.155	.228	.012
	<i>p_{Ne}</i>	.001	.009	.055	.115	.000	.224	.000		.000	.389	.047
	<i>C</i>	.000	.000	.004	.000	.010	.161	.155	.000		.003	.002
	<i>T_r</i>	.159	.013	.174	.192	.481	.000	.228	.389	.003		.352
	<i>P_{out}</i>	.000	.000	.000	.000	.000	.012	.047	.002	.352		

Табл.2. Раскрытие полного изменения.

Компонент	Начальные собственные значения			Ротированные суммы квадратов весов		
	Всего	Изменение (%)	Интегрально (%)	Всего	Изменение (%)	Интегрально (%)
1	4.06	67.65	67.65	2.97	49.49	49.49
2	0.89	14.78	82.43	1.45	24.09	73.58
3	0.63	10.56	92.99	1.16	19.41	92.99

Примечание. Метод получения – анализ главных компонентов.

меньше 0.3 не показаны. Поскольку три компонента являются ортогональными, эти коэффициенты корреляции являются также β -коэффициентами, что следует из (2):

$$\begin{aligned}
 \hat{P}_{in} &\approx 0.942F_1, \\
 \hat{d}_r &\approx 0.905F_1 + 0.343F_2, \\
 \hat{L} &\approx 0.789F_1 + 0.431F_2 + 0.349F_3, \\
 \hat{D} &\approx 0.744F_1 + 0.489F_2, \\
 \hat{P}_L &\approx -0.913F_2, \\
 \hat{p}_{H_2} &\approx 0.943F_3.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Из приведенных соотношений становится очевидным, что переменные P_{in} , d_r , L и D больше влияют на первый фактор F_1 с относительными весами 0.942, 0.905, 0.789 и 0.744. Этот основной фактор соответствует изменению данных 49.49 % (см. табл.2). Переменная P_L с весом -0.913 оказывает сильное отрицательное влияние на второй фактор F_2 , который соответствует 24.09 % полного изменения. Последняя переменная p_{H_2} влияет на F_3 с весом 0.943 и дает 19.41 % изменения.

Здесь следует добавить, что для получения матрицы компонентов использовались различные методы извле-

чения и ротации, и все они дали результаты, очень схожие с результатами из табл.3. Последующий анализ через репродуцированные матрицы, матрицы остаточной корреляции и другие относительные статистики подтвердил адекватность и оценку допустимой ошибки для проведенного факторного анализа. Кроме того, были получены факторные значения, которые можно использовать как независимые ортогональные переменные при дальнейшем статистическом анализе.

Полученные результаты позволяют классифицировать наблюдаемые лазерные параметры (рис.1). По своему физическому смыслу второй фактор P_L (удельная входная мощность) не может быть отделен от переменных L и P_{in} . Таким образом, он должен рассматриваться

Табл.3. Ротированная матрица компонентов.

Параметр	Компонент		
	1	2	3
P_{in}	.942		
d_r	.905	.343	
L	.789	.431	.349
D	.744	.487	
P_L		-.913	
p_{H_2}			.943

Примечание. Метод извлечения: метод главных компонентов. Метод ротации: Varimax с нормализацией Кайзера, ротация сходится за пять итераций.

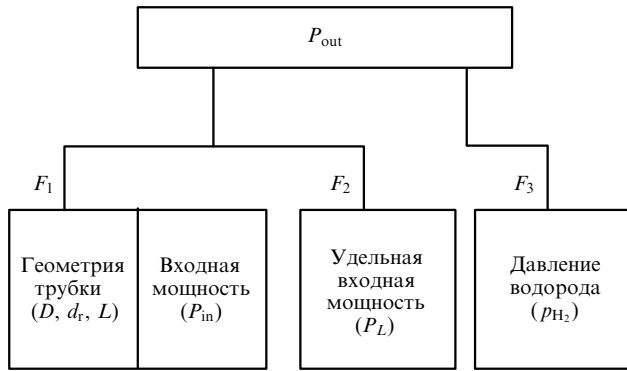


Рис.1. Структура факторов, оказывающих влияние на выходную мощность лазера.

только совместно с этими переменными, хотя формально он ортогонален F_1 и выполняет свои собственные функции. Последние четыре лазерных параметра, предварительно удаленных из факторного анализа, не включены в эту схему из-за их пренебрежимо малой корреляции с выбранными переменными, а также с выходной мощностью.

3. Множественная регрессия

При множественной регрессии необходимо получить соотношение между несколькими независимыми переменными (z_1, z_2, \dots, z_p) и одной зависимой переменной (y). Базовая линейная модель имеет вид $y = b_0 + b_1z_1 + b_2z_2 + \dots + b_pz_p$ или, при использовании стандартизованных обозначений, $\hat{y} = \beta_1\hat{z}_1 + \beta_2\hat{z}_2 + \dots + \beta_p\hat{z}_p$. Здесь коэффициенты регрессии b_i (или β_i) выбраны такими, чтобы пирсоновский коэффициент r между зависимой переменной и линейной комбинацией был максимальным.

Для того чтобы применить регрессионный анализ к исходной выборке данных, были использованы независимые переменные – факторы F_1, F_2, F_3 . Полученные регрессионные коэффициенты приведены в табл.4. Соответствующие модели множественной регрессии имеют вид

$$P_{out} = 7.529 + 25.611F_1 + 3.924F_2 + 9.080F_3, \quad (4)$$

$$\hat{P}_{out} = 0.894F_1 + 0.137F_2 + 0.317 + F_3. \quad (5)$$

Схожие результаты были получены методами ступенчатой и обратной множественной регрессии.

Для подтверждения адекватности регрессионных моделей (4) и (5) был проведен анализ расхождения ANOVA. Полученный уровень значимости $Sig. = 0$, что является хорошим результатом. Коэффициент детерминации $R = 0.958$, таким образом, независимые регрессионные пере-

менные F_1, F_2, F_3 очень хорошо коррелируют с выходной лазерной мощностью. Другой важной характеристикой модели является квадрат коэффициента множественной корреляции R^2 , который в данном случае составляет 0.919. Это означает, что регрессионная модель описывает 91.9% всех наблюдавшихся экспериментальных данных (в процентах от полной дисперсии). Коэффициент автокорреляции Дарбина – Ватсона равен 1.563, и это свидетельствует об отсутствии сильных систематических связей между теоретическими и эмпирическими остатками. Наконец, индекс мультиколлинеарности VIF равен 1, (он должен быть меньше 10); таким образом, коллинеарный эффект практически не наблюдается и полученная регрессионная модель пригодна для интерпретации.

4. Результаты и их обсуждение

Здесь представлена физическая интерпретация полученных результатов, которую можно использовать при разработке и планировании эксперимента.

Наличие внутренних колец увеличивает внутреннюю поверхность трубки, а следовательно, улучшает ее охлаждение и тепловой баланс. Таким образом, создаются условия для более быстрой и эффективной релаксации плазмы, т.е. для диффузии метастабильных атомов, электронов и ионов, а также для их релаксации и рекомбинации в объеме и на стенках трубки. Это ведет к интенсивному восстановлению бромида меди из смеси меди и брома.

В свете вышесказанного удлинение лазерной трубки обеспечивает большее усиление и, следовательно, выходную мощность. Величины D, L оказывают влияние на объемную плотность мощности и соответственно на температурный профиль в поперечном сечении трубки. Увеличение входной электрической мощности можно связать с ростом энергии электронов и большей вероятностью возбуждения верхнего лазерного уровня. В третьей группе параметров наибольшее значение имеет давление водорода. Его роль в увеличении эффективности и выходной мощности лазера уже давно определена экспериментально [16, 17] и не подвергается сомнению.

Проведенное краткое исследование позволяет обоснованно заключить, что полученные результаты полностью достоверны, соответствуют экспериментально полученным данным [16–24] и корректно описывают хорошо известные физические процессы и их влияние, напрямую связанное с выходной мощностью лазерного источника. Таким образом, полученные результаты можно использовать для дальнейшего анализа.

С учетом решения частных задач моделирования для планирования эксперимента на основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Из подвергнутых исследованию независимых параметров на выходную мощность лазера существенное влия-

Табл.4. Множественный регрессионный анализ (зависимая переменная P_{out}).

Модель	Нестандартизованные коэффициенты		Стандартизованные коэффициенты	t	Sig.	Статистика коллинеарности	
	B	Std. ошибка	β			Допуск	VIF
(Константа)	7.529	.558		11.830	.000		
F_1	25.611	.560	.894	38.791	.000	1.000	1.000
F_2	3.924	.560	.137	5.944	.000	1.000	1.000
F_3	9.080	.560	.317	13.752	.000	1.000	1.000

яние оказывают пять материальных физических параметров и один относительный параметр.

2. Предполагается, что для решения задач оптимизации, связанных с повышением выходной мощности лазера, может применяться активное и комбинированное (в направлении увеличения) изменение геометрических параметров и потребляемой электрической мощности при поддержании тенденции к уменьшению P_L . Величина p_{H_2} оказывает большое влияние на выходную мощность. Даже малые отклонения от уже заданного оптимального давления могут приводить к ее существенному уменьшению, и поэтому для определения оптимального давления водорода при новых физических и энергетических условиях рекомендуется провести дополнительные экспериментальные исследования.

3. Предпринятый регрессионный анализ, полученные полиномиальные соотношения и структура факторов (рис.1) позволяют определить группы независимых величин в зависимости от степени их влияния на выходную мощность. Наибольшее влияние оказывают геометрические размеры и электрическая мощность. Если давление водорода рассматривать как термодинамический параметр, то он оказывает относительно независимое влияние на поведение лазерного источника. Влияние параметров S и T_r невелико. Это означает, что в последующих экспериментах их можно не исследовать и что достаточно поддерживать значения этих параметров в пределах уже установленных оптимальных интервалов.

5. Заключение

В работе предложено использовать формальные статистические методы, которые позволяют решать частные задачи в целях планирования эксперимента. Рассматриваются отдельные задачи, позволяющие планировать выборочный и оптимизационный эксперименты. Получены линейные соотношения между наиболее важными независимыми параметрами и выходной мощностью лазера, которые позволяют проводить общую оценку влияния физических процессов на выходные лазерные характеристики. На практике из девяти материальных физических переменных четыре имеют малую степень влияния, что позволяет сократить затраты на исследование. Анализ полученных результатов показывает, что мощность лазера можно увеличить совместным изменением геометрических параметров лазерной трубки и электрической мощности, а также путем активного использования водорода в качестве добавки к буферному газу неону.

Работа выполнена при поддержке ФНИ Болгарского министерства образования и науки, проект ВУ-МИ-205/2006, и НПД Пловдивского университета им. Паисия Хилендарского, проект 07M07.

1. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Федоров В.Ф. *Квантовая электроника*, **37**, 49 (2007).
2. Исаев А.А., Леонов Ю.С. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, №3, 42 (2005).
3. Guyadec E., Nouvel Ph., Regnard Ph. *IEEE J. Quantum Electron.*, **41**, 879 (2005).
4. Шиянов Д.В., Суханов В.Б., Евтушенко Г.С., Андриенко О.С. *Квантовая электроника*, **34**, 625 (2004).
5. Ghomi N., Latifi H. *Jap. J. Appl. Phys.*, **43**, 824 (2004).
6. Шиянов Д.В., Евтушенко Г.С., Суханов В.Б., Бочков В.Д. *Изв. Томского политехн. ун-та*, **307**, 74 (2005).
7. Iliev I. P., Gocheva-Ilieva S.G., Denev N.P., Sabotinov N.V. *Proc. Amer. Inst. Phys.*, **CP899**, 680 (2007).
8. Асатурян В.И. *Теория планирования эксперимента* (М.: Радио и связь, 1983).
9. Montgomery D. C. *Design and Analysis of Experiments* (New York: Wiley, 2004).
10. Джонсон Н., Лион Ф. *Статистика и планирование эксперимента в технике и науке* (М.: Мир, 1981).
11. Carman R.G., Brown D.J.W., Piper A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 1876 (1994).
12. Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **30**, 501 (2000).
13. Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Жданев О.В., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **33**, 1047 (2003).
14. Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г. *Квантовая электроника*, **24**, 596 (1997).
15. Земсков К.И., Исаев А.А., Петраш Г.Г. *Квантовая электроника*, **27**, 183 (1999).
16. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V.K., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. *IEEE J. Quant. Electron.*, **33**, 705 (1997).
17. Astadjov D. N., Vuchkov N.K., Sabotinov N.V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **24**, 1926 (1988).
18. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Little C.E., Sabotinov N.V. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30**, 1358 (1994).
19. Stoilov V.M., Astadjov D.N., Vuchkov N.K., Sabotinov N.V. *Opt. Quantum Electron.*, **32**, 1209 (2000).
20. *NATO contract SfP, 97 2685* (50W Copper Bromide Laser) (2000).
21. Vuchkov N.K., Astadjov D. N., Sabotinov N.V. *Opt. Quantum Electron.*, **23**, S549 (1991).
22. Astadjov D.N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V., Little L., Little C.E., Sabotinov N.V., Vuchkov N.K. *Opt. Commun.*, **135**, 289 (1997).
23. Dimitrov K.D., Sabotinov N.V. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3052**, 126 (1996).
24. Astadjov D. N., Dimitrov K.D., Jones D.R., Kirkov V.K., Little C.E., Sabotinov N. V., Vuchkov N.K. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 705 (1997).
25. Denev N.P., Astadjov D.N., Sabotinov N.V. *Proc. IV Int. Symp. on Laser Technologies and Lasers 2005* (Plovdiv, 2006, p. 153).
26. Landau S., Everitt B.S. *Handbook of Statistical Analyses Using SPSS* (Boca Raton, FL: Chapman & Hall/CRC, 2003).